BLUE BACKS

クォーク 第2版

素粒子物理はどこまで進んできたか

南部陽一郎



クォーク 第2版

素粒子物理はどこまで進んできたか

南部陽一郎　著

ブルーバックス

カバー装幀／芦澤泰偉
本文イラスト／鈴木吉男
本文図版・編集協力／さくら工芸社

まえがき

この本の前身である『クォーク——素粒子物理の最前線』（ブルーバックスB480）を書いた一九八〇年代の初めには、基本粒子であるクォークとレプトンの族はただ一個を除いてすべて知られており、現在素粒子論の標準模型と言われているものもできあがっていました。そのうえ大統一理論、超対称理論、超弦理論など、標準模型の次をめざす有望な理論も芽生えていました。しかしこれらの理論がどこまで真実であるかがまだわからなかったので、その予言するところを実証するために、新しいいろいろな加速器、観測施設などが企画建設され、多くの実験家たちが十数年たいへんな努力をしてきたわけです。

その結果、WとZボソン、トップ・クォークの存在がめでたく確認されたばかりでなく、定量的にも標準模型は素粒子の正しい理論としてほとんど疑いのないものとなりました。ヒッグズ粒子の存在、ニュートリノの質量など、将来の実験に待つ重要な問題がまだ残っていますが、ここで一応いままでの成果を整理する機が熟したと思われるので、この際改訂と追加を行って新しい本とすることにいたしました。

もともと素粒子の発展をたどってその意味内容を説明していくという旧版の目的に沿って、いまではあまり重要でなくなった話題もそのままにして、情報や術語などだけを改新したほか、あ

らためて現在の標準理論の総括をしておきました。その先の理論については内容の説明をさらに敷衍(ふえん)し、最近の発展とその期待するところの紹介を試みました。すでにある程度素粒子物理の知識をもっている読者は、まず第20章から読み始められてもよいでしょう。

新しい資料についてお世話になった、山内泰二博士とM. Oreglia教授に感謝いたします。

一九九七年八月

南部　陽一郎

旧版まえがき

素粒子物理学の目的は物質の究極的構造と、それを支配する基本法則を明らかにすることです。その素粒子物理が過去五〇年の間にどんなふうに発展し、現在どんなことがわかっているかを、かなり具体的に、また系統的に説明しようと私はこの本で試みました。

幸いにして日本は素粒子物理学にこれまで第一流の貢献をしてきました。湯川、朝永両博士の名を知らない人はないでしょうが、それ以外にも多くの学者が世界的な業績を出しています。これらは単にすぐれた個々の仕事であるだけでなく、全体として素粒子理論の進むべき方向をわれわれに教えました。

私もこのような伝統の下に育った者なので、最新の知識を既成のものとして紹介するよりも、むしろ物理学者がどんな考え方をたどって現在の位置に到達したかを説明することに重点をおいたつもりです。もちろんある程度の専門的知識を仮定せずにこれをすることは無理なのですが、少なくとも研究とはどんなプロセスであるかを理解していただければけっこうだと思います。

過去五〇年の間に素粒子物理は大変な進歩をとげました。陽子や中間子はもはや素粒子ではなく、その代わりにクォークが登場しました。そればかりでなく、今まで関係のないものと見なさ

れていた各種の力も統一される可能性が生まれました。さらにおどろくべきことは、極大の世界である宇宙全体の歴史が極小の世界の問題と切りはなせなくなったことです。

もちろん理論は実験と相まって進むものです。昔のサイクロトロンと比べて現在の加速器のエネルギーは一〇〇万倍に上がり、何千人もの人員を使い国際出資を必要とするような規模になってしまいました。それでも研究者は常に次の段階を夢みています。もし幸いにして世界の平和が今後も続けば、このような夢もだんだん実現されていくでしょう。今まであれだけ理論に貢献した日本が、実験の方面でも活躍してほしいものです。

この本を書き終わったころ湯川博士が亡くなられました。一つの時代が過ぎ去ったという感じがします。これからの素粒子物理の発展を追おうとする若い読者諸君に、この本が手引きとしての役を果たせば幸いです。

最後に、本書のさし絵のために材料を提供してくださったR. Levi-Setti教授と山内泰二博士に感謝の意を表します。

一九八一年一〇月

南部　陽一郎

（旧版）第11刷にあたって

第1刷が出てから五年になりましたので、その間に起きた新しい事情を考慮して、本書にいくらかの加筆補正を致しました。

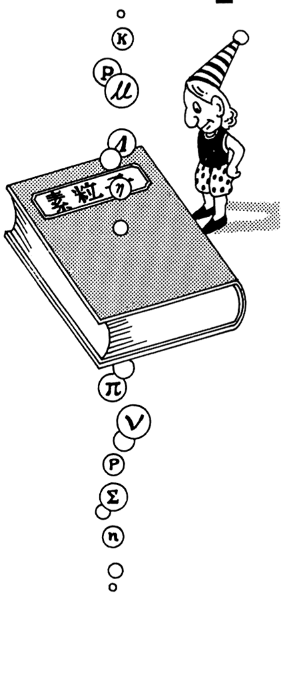
湯川博士の逝去によって、一つの時代が過ぎ去ったと第1刷に書きましたが、現在まさにそれを裏づけるような変革が素粒子論の中で起こりつつあります。このことを説明するために、とくに新しい一章（注：旧22章「素粒子物理学のゆくえ」）を加えました。

一九八六年九月

著者

もくじ

1　素粒子とは



答があるかどうかわからない問い

物理学に特別関心をもっている人はもちろん、そうでない一般の人でも「素粒子」という言葉はどこかで聞いたことがあるにちがいない。早い話が、朝日新聞夕刊の社会批評欄は「素粒子」と名づけられている。

もちろん素粒子欄の記事の内容と物理学で言う素粒子と何の関係があるわけではないが、素粒子という言葉が一種の特別な魅力をもっているからこんな名前がえらばれたにちがいない。そしてその理由は何かと考えると、おそらく湯川秀樹の中間子論にはじまる日本の素粒子論の伝統が世界的に誇るべきものとして、一般人の意識に定着しているからであろう。

湯川理論は私が高校生のころに生まれた。素粒子という言葉は、私が大学に進んで物理を専攻しはじめたときには普通に使われるようになっていて、私も同級生の数名といっしょに「素粒子

論を勉強したい」と教授に願い出たわけである。英語では素粒子をelementary particleという。エレメントとは、ふつう要素とか、単位とか訳されるが、化学では元素のことである。物質を構成する基本材料で、あらゆるものはそれらの組合せで作られ、それ自身は他のものから作られないようなものを意味する。こんなエレメントが存在するということは、昔から人間が外部の世界を理解しようとするとき自然に生まれる仮説であろうが、現代の自然科学におけるエレメントという考えの発展は、とくにギリシアの自然哲学の影響を大きく受けている。

それではいったい何がエレメントなのか。よく考えてみればこの質問は二つの部分に分けられる。まず第一に、そもそもエレメントなるものが存在するかどうか、次に、もし存在すればそれは何か、である。これに答えようとするのが素粒子物理学であることはもうおわかりであろう。

しかし答は簡単ではない。いや本当に答があるかどうかもわからない。自然科学が生まれる前に、例えば土と水と火と風がエレメントだという説があった。これはギリシアのアリストテレスから発したもので、自然界が人間に及ぼす影響、とくに雨、風、雷、地震などの被害をエレメントのせいだという表現が英語などにあるのはこの説のなごりであろう。

現在ではもちろん地、水、火、風をエレメントと考える人はいない。物質を本当に細かく分割して最終単位を求めるという態度は自然科学の背後にある実証的立場であるが、実際はこれを文字どおり実行してもすぐ行き詰まってしまう。

ナイフでものを切り刻んでも、顕微鏡でものを検査しても、一向にそれらしき限界には到達しない。一ミクロン程度の粒にはいろいろな形やサイズがあり、まだまだ中に構造がありそうだが、技術的にナイフや顕微鏡でこれ以下の小さな領域にはなかなか進めない。第一、ナイフ自身がエレメントから成り立っているなら、そのエレメントのサイズ以上に鋭い切先は作れないはずである。できるだけ細かい領域を調べるにはできるだけ鋭いナイフが必要だから、これは結局同じ問題に帰着してしまう。

一九世紀に化学、つまり物質の化学的変化に関する知識が進歩して、はじめて近代の意味でのアトムまたは原子といわれる概念が生まれた。古代ギリシアの哲学者デモクリトスは、物質がすべてアトム（atom = a-tom = 不 - 分割、すなわち分割不可能）という不変の要素から成り立つという仮説を立てたが、化学でいう原子は化学反応の研究によって自然に生まれたものである。それは前に述べたような素朴な機械的分割に基づくのではなく、全く別の原理によっている。次にこれを説明しよう。

何か不変に保たれるものがある

化学物質A、B、C、D、……をいろいろ混ぜ合わすと化学反応が起こる。例えば、

(1)　A＋B＝C

(2)　A＋D＝E＋F

などである。われわれは、何と何を混ぜたら何が生ずるかを定める法則を知りたいが、その第一歩として、これらの反応に何らかの規則性があるかどうかを調べよう。

その結果としてまず反応の前後で全体の質量が変わらないことがわかったとする。すなわち右の式を読み変えて、A、B、C、……はそれぞれの物質の質量を表すものとすると、これらの式は、普通の意味の等式と見られることになる。

ここでわれわれは自然界に一つの保存則があることを発見した。つまり質量保存の法則である。物質は反応し合い、性質が全く変わってしまうが、それにもかかわらず何か不変に保たれるものがある――これが保存則の意味である。

さて化学反応にもっと細かい規則性があるかどうかを追究して、その結果、次のことがわかったとしよう。

(1)の反応が起こるには、いつでもAとBを一対二の重量比で混ぜなければならない。例えばAとBを同じ重量だけとれば、Aの半分は反応せずに残ってしまう。同様にして(2)の反応でもA、D、E、Fは一定の重量比をもつ。一般的に言えば、反応に関与する各物質の重量の間にはその反応に特有な整数的関係がある。

右の事情にいったいどういう意味があるのだろうかと考えるのは、実は一九世紀の化学の発展を自分でもう一度たどってみることにほかならない。答は誰でもすでに知っていることだからパズルにはならないが、ともかく次のような疑問が頭に浮かぶのは自然だろう。

すなわち、いろいろな反応を通じて最も小さい整数で表されるもの（物質）があるはずだが、そうならばほかの物質はみなこれから組み立てられるではないか。比が整数だというのは、基本物質自身が何か最小の基本単位からできているからではないか。そこでこの基本単位をアトム（原子）と名づけ、この仮説をいろいろな場合に適用してみたらどうか……。

実際の化学はもっともっと複雑である。原子は一種類だけではない。水素原子は一番軽いが、それ以外に多くの原子（元素）があって、重さは水素原子の整数倍だが、水素原子には還元できない。さらに精密にしらべれば、ほかの元素の原子量が水素原子の整数倍というのは近似的な話にすぎない。質量の保存といっても、これも厳密ではない、等々といろいろな問題が出てくる。

本当にあるのか？

それは別にしても、ここで原子の実在性はどうだろう。いくつかの元素が物質として存在することは、化学実験をする人には疑いのない事実だ。水素、酸素、炭素など、実際に遊離できるからである。しかし原子となると話は別である。一個の原子は大きさもわからない。到底目には見

えそうもない。その意味でデモクリトスのアトムと同じ仮説にすぎないようだ。

けれども大きなちがいはある。まず、化学的な原子は数量的な法則を根拠にもっていて、実験によって、その真偽が検証できる。次に研究の進歩とともに、原子の実在性自体がいろいろな方面から確立されてくる。原子の大きさが決定できるし、ある意味では目にも見えるようになる。

例えば泡箱に残す粒子の軌跡は、われわれにアトムを実際に見ているような「錯覚」を与える。アトムの大きさが10^{-8}センチメートル程度ということを習った人は、それが実際に見えるはずはないと片づけてしまうかもしれないが、これは果たして錯覚だろうか。

目の前にこの本が見えるが、本は大きいから実在するとは言い切れない。われわれの頭脳に入るのは、本から反射する光の刺激であって、本そのものではない。泡箱の軌跡は、荷電粒子が泡箱の中の液体を刺激してイオン化させ、それらのイオンが種子となって泡粒を発生させ、泡粒が成長すれば光を反射して見えるようになる、という過程によるものである。これは本を見る過程より複雑だが、本質的にちがうと言えるだろうか。

「実在とは何か」は昔から哲学者がとり上げてきた問題であるが、その出発点は右のような素朴な疑問にある。この疑問に対する科学者の態度は、極めて常識的なもので、われわれが日常使っている推論方法の延長にすぎない。

もし目の前に見える本が実在するかどうか疑わしいと思ったら、われわれは手を出してさわっ

てみるだろう。それでも夢かもしれないと疑えば、傍の人にたずねて、同じ本が見えるかどうか確かめるという手もある。あらゆるチェックをしてみてどこにも矛盾が生じなければ、われわれは本が実在すると結論する。一度結論してしまえば、もちろんこんなめんどうなことをいちいち繰り返すわけではなく、実在性の疑問は意識の外に出てしまう。しかし今までに経験したことのないものに初めて出会うとき、例えばＵＦＯを見たとき、われわれがどうふるまうかを考えてごらんなさい。右に述べたチェックの過程がなるほどと理解できるだろう。

原子の実在性も結局は同じプロセスによって確立されたものである。原子がかくかくの性質をもつと仮定してあらゆるチェックをパスすれば、われわれは原子が実在すると信ずるようになる。そしてチェックの種類をふやすにつれて、原子の性質に関する知識が精密になる。つまり原子の実在性を根本的に覆すことなしに、絶えず修正したり、補充したりしていくわけである。もし仮説がよくなければすぐどこかにボロが出て、いろいろ見苦しい小細工をしなければならなくなるだろう。小細工が次から次へと必要になるような仮説はたいてい根本からまちがっているから、御破算にして出発し直すべきである。これに反して正しい仮説をうまく見つければ、あらゆる謎が次から次へと解けてくる。これは例えばクロスワードパズルを解こうとするときの事情によく似ている。確かだと思うやさしい箇所から出発していろいろな単語をあててみる。ある程度うまくいくようでも、詰めてゆくとどこかに矛盾が生ずる。単語を多少変えてもなかなかスムー

ズに進まない。しかし突然インスピレーションが閃いて正しい鍵を発見する。あとはほとんど自動的である。

物理学におけるこの仮説がこのような状態に達したとき、われわれはそれが真実であり実在であると認めて疑わなくなる。けれども物理学は閉じたものではなく、いくらでも前進するから、こんな平和な状態がいつまでも続くことはまずないといってよい。どこかで破綻が生じて今までの仮説が役に立たなくなる。そこで昔やった努力をもう一度繰り返すわけであるが、これだけ確かな検証を経てきた理論体系が根本からくつがえるはずはない。ただ新しい情況のもとでは今までの体系は役に立たず、それを特別の場合として含んだ大きな体系が必要になるのである。

さて話を前にもどそう。原子がエレメントであるということは、今でもまちがいではないが、私が学生のころは湯川中間子などが本当の「素粒子」であると思われていた。ところが近頃はそれに代わってクォークとかレプトンとかの名が一般にもよく知られるようになった。現在の物理学者に尋ねればこれらが本当の「基本粒子」だと答えるであろう。

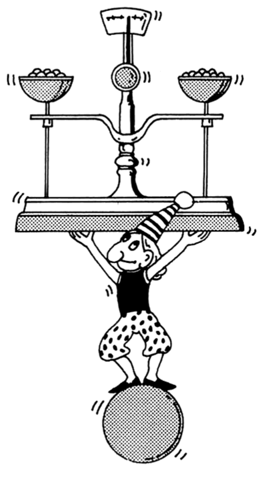
それではクォークやレプトンとはいったい何ものなのか、原子や中間子との関係はどうなのか。これを語ることがこの本の目的であり、それは同時に今世紀の原子物理学の発展を語ることにもなる。しかし時間的に発展をたどることをやめて、逆に現在から出発し、過去にさかのぼることにしてみよう。

2 クォークとレプトン

誰も見つけていない型破りの基本粒子――クォーク

クォークというおかしな名前は、クォーク仮説の提唱者の一人であるゲルマンがつけたものである。その由来はあとでもっとくわしく話すことにするが、現在「基本粒子」だと考えられている粒子の中の一つで、未だに仮想の域を完全には脱していない種類のものである。

前に述べたように、基本粒子とは現在の時点でのエレメント、すなわち物質を構成する最も基本的な単位をさす。また仮想の域を完全には脱していないとはいえ、現在まで知られている現象の中でこの仮説で説明できないものはないから、これは少し慎重を期した控えめの表現にすぎない。ただ原子や原子核や電子のように、その存在を誰も絶対に疑わないという段階には達していないのである。



ではなぜ多少の疑問が残るのであろうか。それはクォークがほかの既知の粒子に見られない独

特の性質をもつとされているが、そんなものをまだ誰も見つけていないからである。見つけていないというのは、クォークを一個、物質の中からとり出して、その性質を確認することができないことである。在来の粒子は、これに反して、みな一個ずつとり出して測定を行うことができる。原子や電子は、はじめは保存則などから推論された仮説であっても、やがて単純にとり出され、その質量や電荷が決定されるようになった。

クォークはもし単独に存在したら実は非常に検出しやすいはずのものである。それはクォークのもつ荷電量が単位電荷、つまり原子や陽子のもつ電荷に比べて三分の一または三分の二の大きさをもつと仮定されているからである。今までに知られているあらゆるエレメントに関しては、原子でも電子でも原子核でもすべて電荷は0かまたは電子のもつ基本電荷eの整数倍（±1、±2、……）である。だからどんな物質の一かたまりを取っても、その全電荷は厳密にeの整数倍になっているのである。

もう一つ大事なことは電荷の保存則である。粒子の間に反応が起こって他の粒子に変化したり、電荷を交換したりすることがあるが、全電荷は絶対に変わることはない。これは前章で説明した保存則の典型的な例で、これが真ならば、最小の電荷をもつエレメントが存在するのは不思議ではない。ただしこのような最小電荷のエレメントは一種だけではない。質量や他の性質では異なる電子、陽子、その他の$\pm e$の電荷をもつ粒子はたくさん存在するのである。

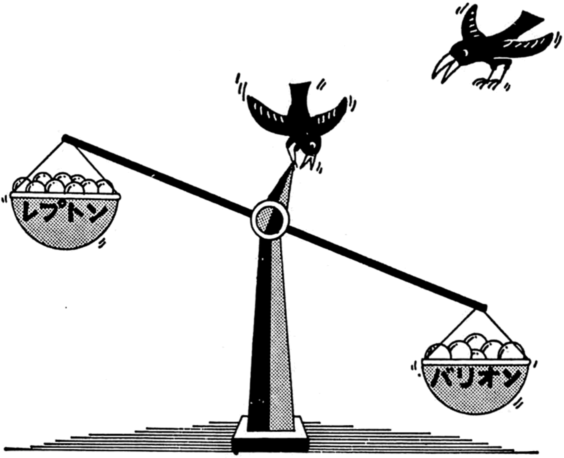
クォークはこれまでの素粒子の概念に反して、$\pm\frac{e}{3}$ または $\pm\frac{2e}{3}$ という型破りの電荷をもつと仮定されている。すなわち電荷の本当の究極単位は e ではなく、$e/3$ であるということになる。それでは電子や陽子のように $\pm e$ の電荷をもつ粒子は素粒子ではなく、クォークから成り立つ複合体なのであろうか。

答は次のようである。陽子はまさにクォーク三個から成る複合粒子で、クォーク理論はもともと陽子を複合粒子と見なす考え方に基づいて導入されたものである。しかし電子の方はクォークから作られたものではなく、相変わらず基本粒子と考えられている。

重い粒子、軽い粒子、その中間

前にクォークとレプトンが基本粒子だとちょっと述べたが、電子はレプトンの方に属するのである。レプトンという名は「軽い粒子」という意味でギリシア語から作られた。他にニュートリノ（ν＝中性微子）、ミューオン（μ＝ミュー）などがレプトン族の基本粒子であるが、電子以外は日常の現象にはあまり現れない。いずれにせよレプトンの電荷は $\pm e$ または0である。

軽いレプトンに対して「重い」粒子は何だろうか。これに相当するギリシア語は「バリオン」で、陽子と中性子はこれに属する。陽子、すなわち水素の原子核が電子の一八〇〇倍ほどの質量をもつことは御承知であろう。中性子（n＝ニュートロン）もバリオンの一つで、陽子（p＝プ



バリオン（重い粒子）とレプトン（軽い粒子）

ロトン）と中性子がたくさん結合していろいろな原子核を作り、そのまわりに電子の雲を引きつけて中性の原子ができ上がるわけである。

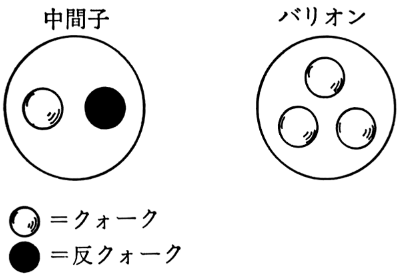
陽子と中性子は原子核の成分であるから、特に「核子」または「ニュークレオン」（N）と呼ばれるが、バリオンはこれら核子だけではなく、ほかにラムダ粒子（Λ）、シグマ粒子（Σ）その他の不安定な重い粒子を含む。そしてこれらのバリオンは実は基本粒子ではなく、三個のクォークから成り立っていると考えられるのである。

バリオンとレプトンの中間に「メソン」、すなわち「中間子」の族がさらに存在する。これは湯川秀樹博士が最初に予言し、現在「パイオン」または「パイ（π）中間子」と呼ばれているものを含む。パイオンの質量は電子の二七〇倍、陽子の七分の一であるから中間子の名にふさわしい。

しかし重さで粒子を分類するのは実はあまり意味がない。メソンにもバリオン程度の質量をもつものがたくさんあるし、軽いレプトン族のミューオンはパイオン程度、最近発見されたタウ粒子（τ）は陽子よりもさらに重い。

バリオンとメソンとをいっしょにして、「ハドロン」と呼ぶ。ギリシア語で「強い粒子」というような意味であるが、その理由はお互いに強い相互作用をするからである。強い相互作用を生むいわゆる強い力とは、電磁的な力や重力とは別個のもので、原子核をまとめる力、つまり核力はこの強い相互作用の一つの現れである。二つの核子の間の力は、一方がメソンを放出し、他方がそれを吸収するというメソン交換過程によって生ずると考えられる。この放出、吸収が頻繁に起こるから、核力が電磁力に比べて強いのである。

クォーク仮説によれば、バリオンが三個のクォークから成るのに対し、メソンは二個のクォーク――実は一個のクォークと一個の反クォーク――から成るとされる。「反」とは今まで説明しなかったが、すべてのレプトンやクォークにあてはまる言葉で、一つの粒子に対応して「反粒子」というものが存在す



2.1　中間子（メソン）とバリオン

る。反粒子はその名の示すように粒子と反対符号の電荷をもち、その他の量子数（後述のストレンジネスなど、粒子の性質を特徴づける数）も一般に反対であるが、質量は同じ。いわば双子の相手のようなものであり、全然別個の粒子というべきではない。例えば電子に対する「反電子」は普通「陽電子」と呼ばれているが、これは陽子と同じ電荷をもっていても、それとは何の関係もない。

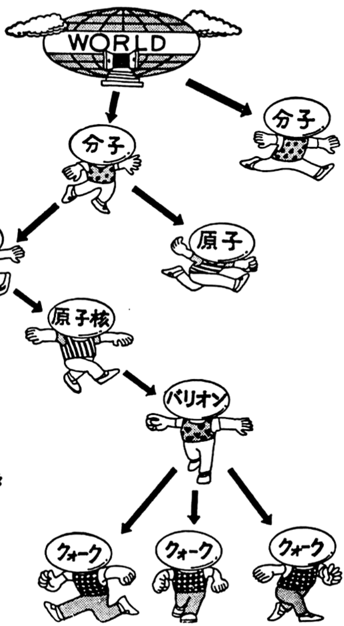
反電子や反陽子が日常の世界に見当たらないのはそれぞれの相棒の電子や陽子と遭遇すると、「対消滅（ついしょうめつ）」を起こして粒子と反粒子がいっしょに消えてなくなり、エネルギーが光子などの形で放出されるからである。逆に反粒子を作ろうとすれば粒子とともに「対発生」させなければならない。こんなわけで、素粒子の種類を数えるとき粒子と反粒子とを区別しないことが多く、いまわれわれもその習慣に従ってクォークと反クォークを一まとめにしてクォークと呼んでいるのである。

メソンがクォークと反クォークとから成るとすればなぜ対消滅しないのか？　それはクォークにいくつかの種類があって、一般に同じ種類のクォークの対でできているのではないからであるが、もっと深い議論は後まわしにせねばならない。

今までの話をまとめてみよう。ハドロン（「強い粒子」）は強い相互作用をもつ素粒子のグループで、クォークから合成されている。その中でバリオン（「重い粒子」）は三個のクォーク（した

がって反バリオンは三個の反クォーク）から成り、メソンは二個のクォーク（実は一個のクォークと一個の反クォーク）から成る。これ以外の組合せは存在しないらしく、単独のクォークなどは見つかっていない。

レプトン（「軽い粒子」）の方は電子やニュートリノなど、比較的軽い粒子を含むグループで、強い相互作用をもたず、単独でも存在しうる。



物質世界の階層構造

日常見られる物質は窮極的にはクォークとレプトンから構成されている。クォークが集まってバリオンとなり、バリオンが集まって原子核となり、原子核と電子が集まって原子となり、原子が集まって分子となり、分子が集まって生物体を作る……というふうに。

このように物質の構成はいくつかの段階を経て行われる。という

ことは、いくつかの大きさのスケールとエネルギーのスケールとがあることを意味する。大きさのスケールの方は明らかであろう。原子の大きさは10^{-8}センチメートルの程度であるが、その細部を見れば10^{-13}センチメートル程度の原子核のまわりを電子の雲がおおっている。次に原子核を細かく見れば、その中に陽子や中性子があり、陽子や中性子を細かく見ればクォークがある「はず」だ。けれども、大きさとは何かと議論しはじめたら、いろいろ問題が生じてくる。

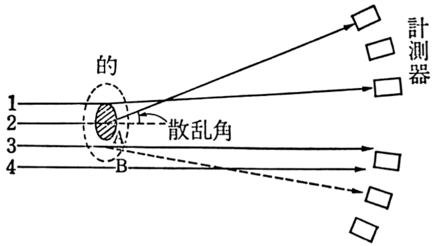
粒子の「大きさ」とは?

一つの問題は量子力学の原理に基づく「波」としての粒子の広がりである。波は本質的に広がっているものだが、一定の大きさをもっていない。しかし波の作り方によってその広がりをコントロールできる。波を小さい場所におしこめようとすれば必然的に波長の小さいものを選ばねばならない。すると波長が運動量に反比例するというド・ブロイの関係により、運動量のゆらぎ、したがってまた運動エネルギーのゆらぎが大きくなる。これがハイゼンベルクの不確定性原理である。エネルギーの大きな状態ほど粒子は小さい領域に局在できるから、粒子を他の物質にあててその内部構造をしらべるのに、精度を高くしようとすればエネルギーを高くする必要があるのはそのためである。

もう一つの問題は粒子の間に働く力のレンジ、すなわち到達距離である。クーロン力(電磁気

力）や重力のように距離の二乗に反比例してしだいに弱くなる力は、無限大の到達距離をもつと言われる。これに反して核力のような「湯川型」の力は有限の到達距離をもち、ある距離以上では指数関数的に弱くなるから、到達距離の外では力は実質上働かないと考えてよい。

核力の到達距離は10^{-13}センチメートル程度で、二個の核子が到達距離以内に近づけば強い力のために運動が乱されるので、事実上核子の大きさが10^{-13}センチメートルであるかのように見える。一般にハドロンの間の強い相互作用はみな10^{-13}センチメートル程度の到達距離をもち、したがってハドロンの「大きさ」はその種類にかかわらず10^{-13}センチメートル程度であるということになるのである。



2.2　的に当たった弾丸が，はじめの進行方向からそれる角度が散乱角である。もし的がAより大きいBの大きさだったとしたら，Aの的に当たらないで素通りした3の弾丸も，点線矢印のように散乱する。したがって，入射した弾丸のうちのいくつが散乱したかを数えれば的の大きさ（全断面積）がわかる。

散乱実験でわかること

ある素粒子の構造をさぐろうとする実験の多くは、射的のようなものである。その粒子を「的（まと）」と考え、別の粒子を「弾丸」として用意して的にぶつける。弾丸の軌道には量子力学的ふらつきが

あるが、エネルギーを上げればこのふらつきはいくらでも小さくできる。しかし的と弾丸との力が有限の到達距離の強い力ならば、到達距離以内に弾丸が近づけば必ず「当た」ってしまう。

このような射的実験で測れる量の代表的なものは「散乱断面積」すなわち的の大きさと、「散乱角分布」すなわち弾丸が的に当たってある方角に散乱される確率とである。これらを測るには、一定の強度の弾丸の流れ（ビーム）を送り込み、ある方向に測定器を配置して、その中に飛び込んでくる粒子の数を数えればよい。角度を変えて数の変化を見れば角分布がわかり、あらゆる角度で結果を足し合わせ、入射量と比較すれば断面積がわかる。

もちろん散乱は電子と陽子の間でも起こるが、これは到達距離の長いクーロン力によるもので（クーロン散乱）、角分布やエネルギー依存性などが強い相互作用による散乱の場合と異なる。クーロン散乱においては、的の中心から遠く外れて、あまり方向を変えない散乱が多い（的の電荷が広がっているときにはこの傾向はますますはなはだしくなる。ラザフォードが原子の中に小さな陽電荷の核があると結論したのはこの原理に基づいたものである）。

二つの粒子が衝突するとき、単なる散乱だけではなく、一般には多種多様の反応が起こりうる。電子と陽子のクーロン散乱でも、電磁波、すなわち光子がいくつか放出されうる。また電子を水素原子にぶつけるとき、電子のエネルギーが一定の「しきい」を超せば、原子を陽子と電子とに分解しうる。

これらを反応式で書けば、

$$e+p \longrightarrow p+e+\gamma,\quad p+e+\gamma+\gamma',\ \cdots\cdots$$

$$e+H \longrightarrow p+e+e'$$

となる。eは電子（エレクトロン）、pは陽子（プロトン）、γは光子（ガンマ線）を意味する。Hはもちろん水素原子である。

これらの反応は単純な「弾性散乱」に対して「非弾性散乱」とも呼ばれる。ハドロン同士の反応の一つの特徴は非弾性散乱の確率も種類も多いことである。すなわちAとBとをぶつければ、A、B、C、D、E、F、……といろいろな粒子が続々と出てくる。そしてどの二つを衝突させても力の到達距離は同じ程度だし、反応の種類が多いことも似ている。

こんなわけでハドロンの性質は簡単でもあり複雑でもある。ハドロンの種類が多いことは、ハドロンが「素粒子」でなく、内部構造をもつことを示唆（しさ）するが、これらの中のどれかが基本的で、他のものはその複合体であると言うこともできない。

そこでハドロン反応を整理するためにまずやれることは、2章冒頭で述べた保存則を見つけることである。これによって反応に規則性があることがわかれば、次にこれを説明するために適当な基本粒子を仮定して、ハドロンをその複合体と考える。化学反応の規則性から原子の仮説が生まれたのと同様である。

実際ハドロンの場合にも歴史は同じ途をたどって進展した。そしてこの場合の新しい保存則は後述の「中野－西島－ゲルマンの法則」と呼ばれ、新しい基本粒子はゲルマンとツワイクによって導入された「クォーク」なのである。

3　クォーク探し



陽子、中性子の構造

前の章で述べたように、クォークはハドロンを構成する基本粒子である。ハドロン族の中でバリオンは三個のクォークを含み、中間子は二個（クォークと反クォーク）を含むと考えられる。ゲルマンとツワイクが独立に提唱したこのクォーク仮説の最も特異な点は、クォークの電荷が分数であるということであった。なぜ分数を仮定したかはこれから少しずつ説明してゆくつもりだが、とりあえず一番ありふれたクォークの二種uとdから始めよう。

この記号はupとdownの対を意味し、陽子や中性子の成分になるものである。すなわち原子核は陽子と中性子から構成されるから、これらのクォークはすべての元素の構成要素だとも言える。陽子は電荷がe、中性子は0で、したがって陽子がZ個、中性子がN個集まってある原子核ができたとすれば、その電荷はZeである。この核はさらにZ個の電子をまわりに捕獲して中性の

原子を作る。Zをその原子の原子番号、陽子と中性子の総数$Z+N=A$を質量数という。例えば普通の水素原子は$Z=1$，$N=0$，$A=1$，重水素は$Z=1$，$N=1$，$A=2$，普通のヘリウムは$Z=2$，$N=2$，$A=4$である。

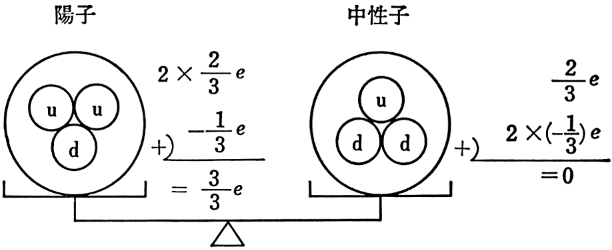
原子核や原子の全質量は構成粒子の質量の和から、束縛エネルギー、すなわちアインシュタインのエネルギー＝質量（$E=mc^2$）の原理に従って束縛の際に放出されるエネルギーを差し引いたものであるが、陽子と中性子の質量が他の寄与に比べて圧倒的に大きく、また陽子と中性子の質量差もほとんどないので、質量数$A=N+Z$が原子核や原子の質量の目安を与える（電子の質量は陽子の一八〇〇分の一にすぎない）。原子の化学的性質は電子の数Zで決まり、重さはAで決まる。Zが同じでA（またはN）のちがう原子同士は同位元素（アイソトープ）と呼ばれる。水素と重水素はその例である。

陽子と中性子が電荷以外の点であまり変わらないように、クォークのuとdも電荷以外はあまりちがいがない。

原子番号と質量数をクォークに当てはめれば

$$\begin{aligned} u &: Z = 2/3,\quad A=1/3 \\ d &: Z = -1/3,\quad A=1/3 \end{aligned} \qquad (1)$$

である。そして陽子と中性子はそれぞれ



3.1　陽子と中性子

という化学式で表される。逆にこの化学式を仮定して、さらにuクォークとdクォークが質量がほぼ等しく、電荷が1だけちがうとすれば(1)の答が出ることが容易にチェックできる。

$$p = uud \qquad n = udd \qquad (2)$$

ではなぜ三個のクォークを組み合わせるのか？　これに対する答は後まわしにせねばならない。しかしともかく陽子や中性子が原子核を分解してとり出せるのだから、陽子や中性子自身もクォークに分解できるはずではないか？　そして電荷が⅔とか$-$⅓とかの粒子が検出されるはずではないか？

分数電荷の粒子をさがす

粒子の電荷を決めるのは比較的容易である。霧箱や泡箱の中を荷電粒子が通るとき、箱の中の媒質（ガスまたは液体）の原子から電子をはねとばして、いわば荷電粒子の種子をま

くので、これが刺激となって霧粒または泡粒の軌跡ができる。その軌跡の濃さは粒子の電荷の二乗に比例し、だいたい速度の二乗に反比例するから、電荷が$\pm e$で光速度に近い高エネルギーの粒子はみな同じような一定の濃さの軌跡を作る。だからこれより薄い軌跡があるとしたら、電荷がeより小さくなければならない。

この原理を使ってクォークをさがしてみよう。大きな陽子の加速器（プロトン・シンクロトロン）で陽子を加速し、このビームを液体水素でできた泡箱の中に通す。陽子と陽子との衝突でいろいろな粒子が発生し、軌跡を残す。その写真を分析して最小の濃さ以下の妙な軌跡があるかどうかさがせばよい。

この方法のクォークさがしは新しい加速器が作られるごとに必ず繰り返されるが、そんな粒子は未だに検出されていない。

自然に存在するクォークをさがすためには、もっと感度のよい別の方法がある。それはかつてミリカンが電荷の最小単位eを決定したとき使った油滴の方法である。液体の中に油の小さな滴を落とすと重力と摩擦のつり合いにより、ある速さでゆるやかに落下する。しかし油滴はときどき電子を液体にとられたり、液体からもらったりするので正または負の電荷を帯びる。したがって外部から電圧をかけておけば電気力をも受け、電荷の変わるたびに運動が変化する。ミリカンは油滴の運動を測定した結果、電荷の変化がeを単位として起こることを見出し、かつその大き

さを決めることができたのである。

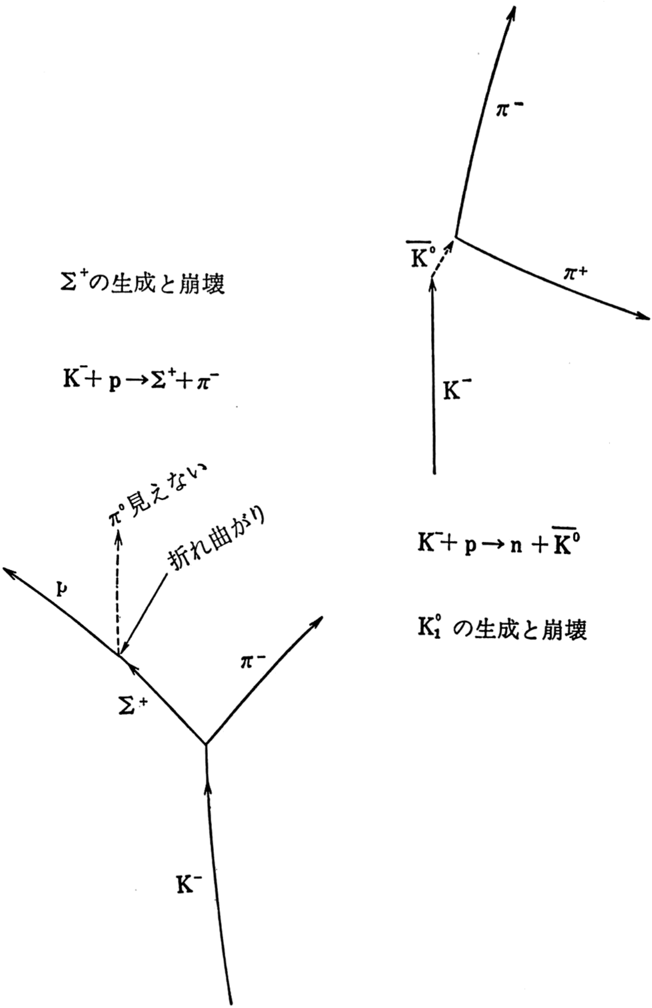
クォークがもし物質のどこかに遊離して存在したらどうなるだろうか？　クォーク仮説によればあらゆる原子核はクォークを三の倍数だけ含んでいるから、遊離クォークが他の原子核や電子と結合しても全電荷をeの整数値とすることは絶対にできない。たとえクォークが不安定で何かに崩壊しようとしても、電荷の保存則を破らない限り、整数荷電の粒子だけには変われない。例えばdクォークの方がuクォークより重ければ、中性子（n）が陽子（p）と電子（e）と反ニュートリノ（$\bar{\nu}$）にベータ崩壊するのと同じ反応が起こるかもしれない。式で両方を比べれば、

$$n \longrightarrow p+e+\bar{\nu}$$

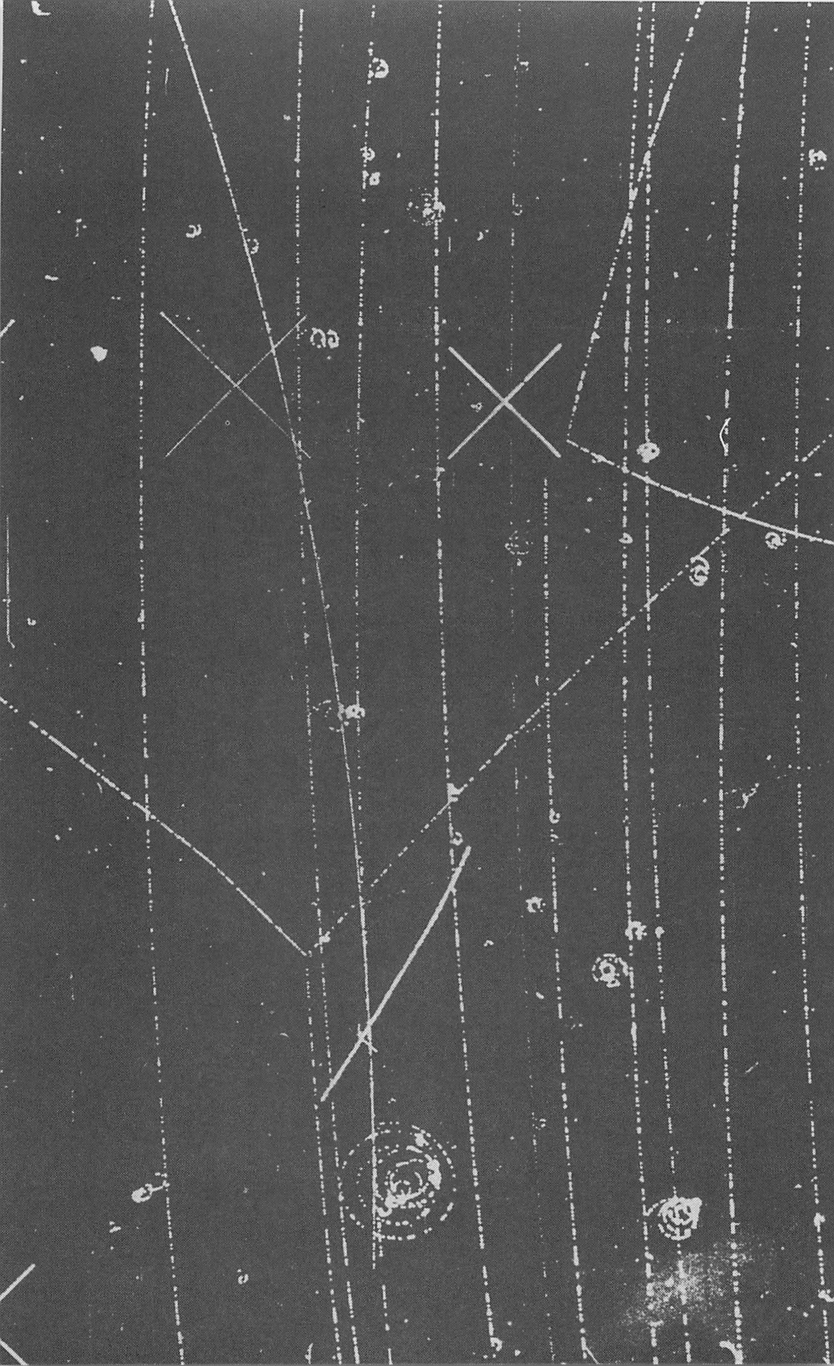
$$d \longrightarrow u+e+\bar{\nu}$$

となりいずれも電荷の保存則を満たしている。しかしさらに軽いクォークがなければ、uはこれ以上何にも変わりようがない。すなわちクォークの少なくとも一種は絶対に安定だということになる。反クォークをとっても事情は変わらない。クォークと反クォークは対消滅して整数荷電の中間子になれるが、このようにしてクォークと反クォークをできるだけ帳消しにした後でクォークまたは反クォークだけが残れば前の場合に帰着してしまう。

さて一ミリの大きさの油滴をとって、その中に一個だけuクォークが単独で含まれているとしよう。こんな油滴がミリカンの実験の中にあったらどうだろうか。電子をやりとりすれば油滴の



3.2　泡箱の中の荷電粒子の軌跡。これはK^-のビームが泡箱の中の陽子と反応した例（写真／Prof. Levi-Setti)



全電荷は2/3，2/3±1，2/3±2，……と変わるが、普通の場合の0，±1，±2，……とは明らかにちがう。

原子の大きさは10^{-8}センチメートル程度だから、一ミリメートルの油滴は$10^7 \times 10^7 \times 10^7 = 10^{21}$ほど原子を含んでいる。すなわち$10^{21}$につき一個のクォーク不純物があっても検出できることになるわけである。

フェアバンクやモンプルゴはこのような実験を数年にわたって続けた。その結果は、多少の疑問は残るにしても否定的であったとするのが妥当であろう。すなわち遊離クォークが存在するという証拠はないのである。

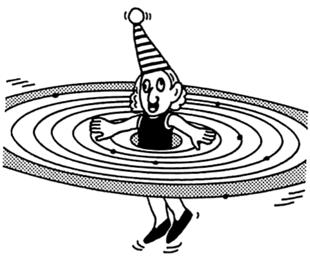
それにもかかわらず、クォークの存在は定説となっている。それは、クォークを仮定することによってハドロンのあらゆる性質を説明することができるのみならず、クォークをハドロンの中から単独でとり出せないことを理論的に説明することもできるようになってきたからである。

これらの事情は、後の章を読むにつれてだんだん明らかになるだろう。しかし、「存在の実証」とは何か、という哲学的な問題は残る。単独で検出されないものを実在と認めうるか、と反論する人があるだろう。たしかにクォーク理論は実在の問題をいっそう複雑にしてしまった。けれども物理学はいつも理論と実験の相互依存の上に成り立っているものである。われわれが測定の結果を信用するのは、測定器具が物理法則に従うのを確信しているからで、電子の存在を立証する

のも、理論の基礎なしではできない。もしクォーク理論が、あらゆる現象を（単独クォークが存在しえないことも含めて）矛盾なく記述できれば、クォーク理論は正しく、したがってクォークは実在として受け入れられるようになる。

では現在の時点で、クォークは電子や陽子と同じ確実度で実在すると言ってよいのか？　この質問に対する答は、物理学者の間でも完全に「イエス」ではないかもしれない。科学的真理の尖端はいつでもぼやけているものである。

4　加速器のいろいろ



強く打てば強く響く奥深い自然

素粒子物理のシンボルは大加速器である。これがなくては素粒子の実験はできず、実験なしでは物理は進歩できない。もちろん素粒子物理学の体系の中には、大きなエネルギーは必要としないが、その代わり非常に微細な効果を検出したり、高い精度の測定が要求されるような部門もある。しかし新しい素粒子や、未知の相互作用を探究するためには、ぜひともエネルギーを上げてゆかねばならない。「質量＝エネルギー」の関係によって、あるエネルギーの反応によって作りうる粒子の質量には限度があるから、一つの加速器で実現可能な反応を一応調べてしまったら、その器械の本質的な役割はもう果たしたといってよい。その次はもう一段階上のエネルギーで……ということになるのである。

エネルギーを上げたら新しい発見ができる保証がどこにあるか？　と問われるかもしれない。

正直なところそんな保証はない。しかし少なくとも過去の経験によれば、新しい加速器が新しい粒子の発見をもたらさなかったためしはない。物質を構成する基本的な少数のエレメントがあるだろうと予想して出発したのに、自然はわれわれを出し抜いて次から次へと新しい粒子をもち出してくる。もちろんたまには眼のするどい理論家が自然現象の中の小さなカギを見抜いて、かくかくの粒子が存在すべきであると予言することがある。そのよい例は湯川博士の中間子やグラシヨウその他数人の貢献に基づくチャーム粒子（クォークの一種）などをあげることができよう。しかし自然はいつでもはじめの予言以上に豊富かつ複雑であることが判明するといっても言いすぎではない。湯川博士は中間子は一種類だと思い込んでいたのに、現在では中間子は無数にある。クォークの種類はチャームでおしまいだという理論的予言を裏切って、b（ボトム）クォークが出現した。

こういう事情があるからこそ素粒子物理はいつまでも新鮮で、われわれを刺激するのである。また莫大な国家予算を投じて大加速器を建設することに文化的価値を認めうるわけでもある。もし基本粒子が全部出つくしてしまったら、世界的大企業としての高エネルギー物理は終わりになるであろう。しかし粒子が全部出つくしたなどとどうして言えるか？　少なくとも現在までの経験では、われわれ人間の眼は自然の奥底までをいっきょにとらえることは不可能のようである。その意味でわれわれは執拗に探究を続けなければならない。

加速器の原理

ここで加速器とはどんなものかを説明しよう。素粒子の実験の根本原理は至極簡単なものである。二個の粒子を衝突させて何が起こるかを見るにすぎない。衝突の結果、一般にいろいろな粒子が作られる。中には不安定で普通物質の中には見られない粒子も生まれる。このような粒子はいったん生成されたあと、ほかの粒子に「崩壊」してしまう。何に崩壊するか、また崩壊するまでの時間（半減期）がどのくらいかは、はじめの衝突反応自体とともに重要なデータである。

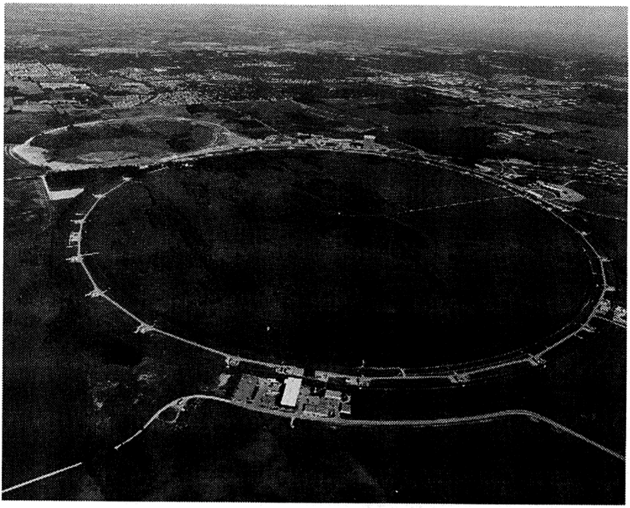
加速器のいちばん簡単な例はテレビ受信器のブラウン管であろう。ブラウン管は御承知のようにテレビの映像を作り出す部分である。真空になっているブラウン管の中の電極フィラメントが熱せられれば電子が飛び出す。高い電圧（五〇〇〇〜一万ボルト）のもとにこれらの電子が一定の方向に加速されて蛍光物質を塗った映像スクリーンに衝突すれば、蛍光物質中に原子を刺激して蛍光反応を起こす、すなわち光子（光量子）を作るわけである。

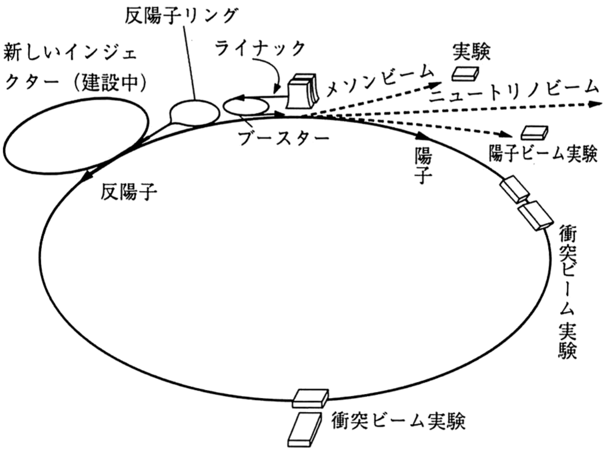
素粒子の実験では電子のみならず陽子（水素原子核）や、その他の元素の原子核なども加速されるが、大別して電子の加速器と陽子の加速器に分けることができる。テレビの例で電圧が何ボルトと言ったが、同じ単位がこれらの場合にもそのままあてはまるので比較するのに都合がよい。

加速器のエネルギーを表すのにeV（電子ボルトまたはエレクトロン・ボルト）という言葉が使われる。例えばフェルミが昔シカゴ大学で使ったサイクロトロンは四・五億eV（四五〇MeV）であった。Mはメガまたはミリオン（一〇〇万$=10^6$）の意味である。これは電極から電子が飛び出して、四・五億ボルトの電圧の下で加速されたときに得るエネルギーにほかならない。このエネルギーは電圧Vと電荷eの積、すなわちeVに等しい。陽子も電子も正と負のちがいはあるが同じ電荷eをもつから、絶対値はどちらも等しい。言いかえればサイクロトロンでは電極から陽子を放出させねばならぬが、そのためにはテレビの場合と反対符号の電圧をかければよいことになる。

原子の中から外殻の電子をとり出すのに要するエネルギー、すなわちイオン化のエネルギーはごく大ざっぱに言って何eV程度のオーダーである（オーダーとは物理学者が大ざっぱな見積りをするとき好んで使う用語で、桁数だけを数える考え方だと思えばよい）。化学反応のエネルギーはしたがってeVのオーダーで、乾電池の電圧が一・五ボルトなのは偶然ではない。

原子核の結合エネルギーはこれと比べれば非常に大きく、一〇〇万eVのオーダーである。すなわち陽子を他の原子核と衝突させて核反応を起こすには、これだけの運動エネルギーを陽子に与えておかねばならない。しかし一〇〇万ボルトの電圧をいっきょにかけるのは技術的に無理だから、磁石の磁場の中に粒子をとらえて円運動をさせ、一回まわってくるごとに電圧を加え





4.1　フェルミ国立加速器研究所
（写真／Fermi National Accelarator Laboratory）

て少しずつ加速する。ちょうどブランコをゆすりはじめるときに、一回ごとに脚をふんばってだんだんエネルギーを大きくするように。これがローレンスの発明したサイクロトロンの原理である。一回に一〇〇ボルトのエネルギーを得ても一〇〇〇回繰り返せば一〇〇万ボルトに達する。このようにして作られた粒子を磁場から解放して的の方向に射出し、その反応で生ずる粒子を測定器で受けとめるのが高エネルギー物理実験の大部分だといっても過言ではない。

エネルギーが一 GeV（$=10^3$MeV　Gはギガで10^9を意味する）以上になると、サイクロトロンの代わりにシンクロトロンと呼ばれる装置が使われる。根本原理は同じだが、真空のパイプをドーナツ形に配置してまわりを磁石でかこみ、その中で粒子を加速する。

しかしエネルギーを上げるためには加速器の円周をだんだん大きくせねばならない。ドーナツの太さは数センチメートルでも、円周の長さは何百メートルにもなる。例えばシカゴ郊外のフェルミ加速器は円周の半径が一キロメートルだから、まるで自動車レースのトラックみたいである。なぜかというと、第一に粒子はエネルギーが大きくなるにつれて曲げにくくなる。磁石の強さに限度があるから、加速器の曲率半径を大きくとらざるを得ない。もう一つの理由は放射によるエネルギー損失である。荷電粒子が運動方向を変えるときに電磁波を放射して運動エネルギーを失うから、粒子を加速するには円周一回転ごとに損失量以上のエネルギーを補給せねばならない。この損失量は粒子の質量を単位として測った全エネルギーの四乗に比例し、円周の半径に反

比例するから、電子のように質量の小さい粒子を加速するのに強い制約を与える。同じエネルギーを出そうとしても、電子の場合は加速器のサイズを陽子の場合よりもずっと大きくしなければならない。

しかし陽子と電子とではハドロンとレプトンのちがいがあり、目的によってどちらも必要だ。もちろんハドロンからレプトンを作ったり、レプトンからハドロンを作ることはできるが、強い相互作用の研究のためには陽子加速器を使う方が便利であり、電磁的相互作用や弱い相互作用の研究には電子加速器の方が都合がよい。だから陽子型と電子型の加速器の両方が作られている。

電子シンクロトロンで一番大きいのはジュネーブにあるヨーロッパ連合原子核研究機関（ＣＥＲＮ（セルン））のＬＥＰ（レップ）というもので、スイスとフランスにまたがって二七キロメートルの周囲をもっている。

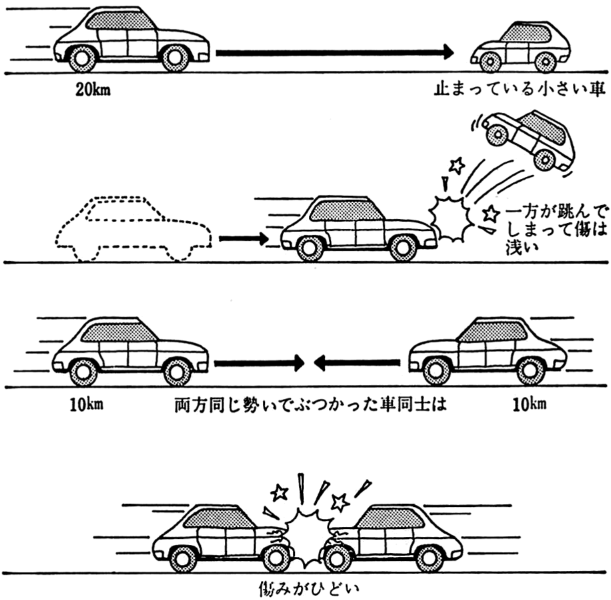
放射損失を避けるもう一つの方法は、円周を回さずに直線のパイプの中を走らせて、一定距離ごとにムチをあてて加速していくことである。走らせる距離に比例してエネルギーが上がる。これを線形加速器（ライナック）という。スタンフォード大学付属の研究所ＳＬＡＣ（スラック）にあるＳＬＣという器械がその例で、五〇GeVの電子ビームを作るのに三キロメートルの長さを必要とする。筑波研究学園都市の高エネルギー加速器研究機構（ＫＥＫ）にも、二・五GeVの線形加速器があるが、これは電子ビームを作る初めの段階の役割と、大量の高エネルギー光子を二次的に

作る「光子工場」としての役割とを果たしている。

加速器の大きさをこのように何キロメートルという規模にしても、いずれは土地や費用の点で限界に来てしまう。そのうえ、ただエネルギーを上げたからといって、粒子の反応エネルギーがそれに比例して上がるものではない。弾丸を固定した的に打ちこんでも、弾丸の運動エネルギーが全部反応のエネルギーになるわけではなく、一部は的をはね跳ばす（反跳）運動のエネルギーに使われてしまう。的が弾丸に比べて重ければ、慣性が大きいから反跳は少ないが、重い弾丸では能率が悪いことは容易に理解できるだろう。この事情は軽い弾丸でも光速度に近づくとひどくなる。というのは相対論的効果によって弾丸がだんだん重くなるようにふるまうからである。したがって有効なエネルギーとしては弾丸のエネルギー E の代わりに重心エネルギー W というものをとらねばならない。固定した的の加速器では W は E の平方根に比例する。つまり弾丸のエネルギーを四倍にしても有効なエネルギーは二倍にしかならない。

衝突型方式――カウンターパンチの底力

しかし同じ加速器で物理実験に使える有効エネルギーをはるかに大きくする巧みな方法がある。それは衝突ビームという方式で、名の示すごとく、反対方向に走る二つのビームを作って正面衝突させることを意味する。つまり弾丸と的との区別がなくなり、どちらも弾丸になってしまま



衝突ビーム方式。止まっている小さな車に大きな車がぶつかると，小さな車は跳ね飛ばされてしまって，破損は意外と少ない。しかし，同じ勢いでぶつかった車同士の破損はひどい。

ったわけである。

固定した的の加速器では W は E の平方根に比例したが、衝突ビームのように両方の粒子の重心が静止している場合には $W=E+E$ である。すなわち加速器のエネルギーと重心エネルギーとは比例し、全エネルギーが反応エネルギーに使われることになる。例えばフェルミ加速器の九〇〇GeVの陽子を静止した水素の的に当てた場合、重心エネルギーは四〇GeVにすぎないが、九〇〇GeVの陽子を正面衝突させれば一八〇〇

GeV になる。大変なちがいだ。

衝突ビームの方法は粒子のエネルギーがその質量（静止エネルギー）よりずっと大きいときに有効だから、現在のトップ・クラスの加速器は全部この方式を採用している。

衝突ビーム方式にも弱味はある。それは反応の頻度が少ないということだ。これは機関銃の弾丸を大きな的に打ちこむのと、弾丸同士を空中で衝突させるのとのちがいを考えれば理解できるだろう。能率をよくするにはビームの強度を上げるとともに、なるべくそれを絞って密度を高くし、細いビームにせねばならない。しかしそれには限界があるから、作られたビームをすぐ使わずにためておく。すなわち真空のドーナツの中をぐるぐる回しながら十分たまるまで待つわけである。

衝突型の加速器では、衝突させる粒子として陽子‐陽子、陽子‐反陽子、電子‐電子、電子‐陽電子、陽子‐電子など、いろいろな取り合わせが可能であり、それぞれ独特の長所をもっている（他に原子核同士を衝突させる重イオン加速器などもあるが、これらは主に原子核反応を研究する目的で作られたものである）。ここで反陽子や陽電子を使う方式は注目に値する。これらは自然物質の中に存在しない粒子だから、加速器の中でまず陽子や電子のビームから対発生によって作らねばならず、生産効率もぐっと下がる。しかしあえてこんなことをするのは、陽子‐反陽子や電子‐反電子の衝突はある種の反応を研究するのに都合がよいからである。幸いにして粒子

と反粒子は同じ磁場の中では反対方向に曲がるから、ドーナツの中を反対方向に回せばよい。

測定装置の問題

素粒子実験のためには、必要なビームを作る加速器ばかりでなく、粒子を検知測定する装置も必要である。検知の一般原理は前の章ですでに述べた霧箱や泡箱の場合のように、荷電粒子が物質の中で放電現象を起こすのを利用することである（ガンマ線のような中性粒子も電子シャワーを作ることで観測される）。しかし最近の大加速器では、チェレンコフ・カウンター、シンチレーション・カウンター、ドリフト・チェンバー、カロリメーター、その他いろいろの方式の装置を組み合わせて使い、その大きさも加速器の大きさに比例して巨大なものになる。ビームのエネルギーが大きくなると、一回の反応でできる粒子の数も一般に大きくなり、ハドロンがジェット（噴水）になって放出されることが多い。またその反面、個々の反応断面積は一般にエネルギーに逆比例して小さくなるから、例えば新粒子生成のような稀な現象を観測するためには、長い時間をかけて、莫大な量のイベントを集め、その中からある条件に従うものだけを選択せねばならない。英語のことわざで言えば、「干し草の山の中から針一本を探す」ようなものだ。これが可能になったのは、大計算機のおかげで測定分析が即座にできるようになったからである。いずれにせよ、加速器だけでなく測定分析の方法も非常に重要な問題であることを強調しておきた

い。

加速器の現在と将来

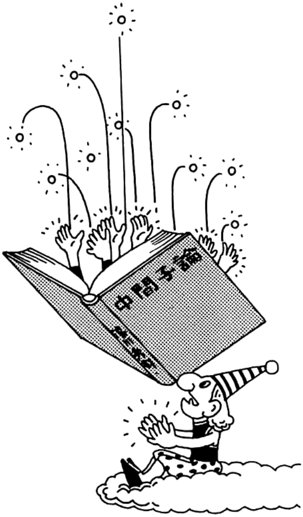
現在最大の加速器は、陽子‐反陽子型ではFERMILAB（フェルミラブ）のTEVATRON（テバトロン）でエネルギーは一・八（〇・九＋〇・九）TeV（Tはテラ＝一〇〇〇GeV）、電子‐陽電子型ではCERN（セルン）のLEPⅡ（レップ）でエネルギーは現在一九〇（九五＋九五）GeVである。また陽子‐電子型ではハンブルグの研究所DESY（デージ）にHERA（ヘラ）という器械があり、八〇〇GeVの陽子と三〇GeVの電子とを衝突させる（W≒300 GeV）。筑波研究学園都市の高エネルギー加速器研究機構にはTRISTAN（トリスタン）という六〇GeV（三〇＋三〇）の電子‐陽電子型の加速器があったが、次の計画に切り替えられた（21章二六八ページのBファクトリー）。

しかしもっと大きな加速器を……という物理学者の夢はまだ終わっておらず、次の世代の加速器の計画がすでに進められている。CERN（セルン）のLHC（Large Hadron Collider）は七TeV＋七TeVの陽子‐陽子型計画で二一世紀に完成の予定である。

六〇年以上前にローレンスがサイクロトロンを発明したとき、そのエネルギーは一MeVのオーダーであった。それ以来加速器のエネルギーは着々と上昇し、現在一〇〇万倍の一TeVのオーダーに達したわけであるが、これはいろいろ技術の進歩に負うところが多い。新しい加速方式

が入れ替わり立ち替わり現れたおかげで、建設のコストはあまり上がっていないからである。
　しかし加速器の根本原理は変わっていないから、このような幸いな状態がこれからも続くとは考えにくい。常識的に見ても、加速器の規模は、費用、地理的条件、その他あらゆる点で、もう事実上の限界に近づいているように思われる。そうだとすれば、素粒子物理の将来はどうなるだろうか？
　この深刻な疑問は当分おあずけにして、24章で、理論と実験の両方の立場から検討することにする。

5　湯川理論の誕生



原子から原子核へ

原子の構造と性質に関する理論は量子力学の出現によって完成したといってよい。それより先、原子が何ものから成り立っているかという実体的な問題は、一九一一年、ラザフォードのみごとな推論によってはっきりした。彼はアルファ粒子（ヘリウム原子核）と原子の散乱の性質に基づいて、原子の中心に重い陽電荷の核があり、いくつかの電子がそのまわりに雲を作っていると結論したのである。しかし電子が実際にどんな運動をしているか、特になぜ電子が電磁波を放射して徐々にエネルギーを失わないのかは古典的な電磁力学では理解できない。

一九一二年、ニールス・ボーアは量子論的な原子模型を導入し、電子は「量子化」された特定の軌道の上しか走らず、放射をするときは一つの軌道から他の軌道へ突然非連続的な飛躍をすると大胆な仮定をした。これによって原子が発する光のスペクトルの性質はだいたい説明された

が、まだ過渡的な理論にすぎなかった。一九二五年、ハイゼンベルクとシュレーディンガーによって見出された量子力学が出現してはじめて原子の安定性が本質的に理解されたのである。

簡単に言えばそれは電子が波のような性質をもち、原子核のまわりに一種の定常波を作らねばならないからである。これを日常の現象にたとえれば、ピアノやバイオリンの弦は一定の条件では一定の固有振動数、つまり基本振動数か、その整数倍の倍音（ハーモニックス）しか出せない。原子の中の電子波についても同様な事情が存在し、その固有振動はシュレーディンガーの波動方程式によって定められる。

量子力学は原子の謎を解明するとともに、物理現象の記述法に大変革をもたらした。ニュートン以来の古典的な運動法則に代わって、量子力学的な法則が用いられるが、そこでは方程式が少し変更されたという程度のちがいではなく、記述の方法自体が異なる。粒子の位置や速度がどうなるかではなく、それらの確率分布を与える確率振幅というものがどうなるかを決めるのが運動法則になるのである。しかしこの本は量子力学を説明するのが目的ではないから、これ以上立ち入ることは控えておくことにしよう。もともと量子力学の話をもち出したのは、それの適用範囲について過去の物理学者がどう考えていたかを問題にしたかったからである。

量子力学によって原子の物理が解決された。すなわち原子の性質は原子核と電子から成る系に量子力学を適用すれば説明できる。しかし原子核の内部のことはまだわからない。原子核は素粒

子ではなく、多くの陽子と中性子から成るらしいが、それらを結合する力は電磁力ではなく、全く新しい性質のものでなければならない。したがってその記述方式も量子力学ではだめかもしれない。エネルギーのスケールもちがう。原子内の電子の運動エネルギーは数電子ボルトの程度で、それに相当する電子波の波長は10^{-8}センチメートル、すなわちちょうど原子の大きさほどであるが、原子核内の核子の場合はエネルギーも波長もだいたい一〇〇万のオーダーほどちがう。だから原子核の構造を解明するにはこれらの事情を全部考慮しなければならず、その解決は容易ではないだろう、というのが湯川博士が現れる前に物理学者の心の奥に潜んでいた懸念であったようだ。

ある意味ではこれは正しい。現在でも核力の詳細を基本方程式から導くことはできない。核子自体がもう素粒子とは見なされないから、いわば複雑な高分子の性質をシュレーディンガー方程式から出発して決定せよというようなもので、むしろこれは無理な話である。

私の見るところでは、湯川博士の功績は、既存の理論体系、すなわち量子力学と（特殊）相対論とをあくまで信頼し、核力のような到達距離の短い力をこの体系の中でいかに記述できるかを一般問題として取り上げられたことにあった。その結果として導かれる答は未知の粒子の存在を要求する。しかしこれが論理的に自然な帰結ならば、まだ実験的証拠が何もなくても恐れることはない。

歴史の発展は実際に湯川博士の予言を裏書きした。博士自身が語っておられるその当時の心境をここに引用しておこう。

ふりかえってみると、一九三四年の秋に核力の理論の帰結としての中間子の存在に思い到った当時の私の心は不思議なほど自信に満ちていた。今日では物理学の理論というものは仮説の上に成り立つというポアンカレ流の考え方が常識となっている。私もその通りであると思う。しかし、だからといって、自明の真理から出発せよというデカルトの主張が無意味になったとは思わない。持続的に、そしてやや異常なまでに、一つの問題に思考力を集中させている過程の中で思いあたったことの一つが、自明であるように見えだす。だから、そこに自信が湧いてくる。それをさらに推進させようとする意欲も出てくる。それは客観的には、それからの結論と経験的事実との対比によって、はじめて正否が判定されるべき仮説である。しかし、当人にとっては、少なくとも初期のある期間は、それは「それ以外の可能性が考えられないところの真実」である。そういう両面性の一方だけしか認めない人とは創造性、特に理論物理学における発見とは何かについて、所詮ともに語ることはできない。（高内壮介『湯川秀樹論』一九九三年、第三文明社刊より）

湯川の中間子論

　では湯川の中間子理論とはどんなものだろうか。これを次に説明することにしよう。核力を考察するにあたってまず出発点となるのは、すでにわれわれがよく理解している力、すなわち電磁力と重力である。前に述べたように、これらは無限の到達距離をもつ力で、そのポテンシャル・エネルギーは距離に反比例する。この事情は、数学的に言えば、静電場も重力場もラプラスの微分方程式というものに従うことに由来するものである。しかしラプラスの方程式は、力の源が静止している特別な場合に適用されるにすぎず、もっと一般的には電磁場の場合はマックスウェルの方程式、重力場の場合にはアインシュタインの方程式で記述されるべきものである。これらの方程式の一つの特徴は、光速度で伝わる波がその解として存在することである。

　一九世紀の後半に、マックスウェルは、ファラデーその他の先覚者が発見した電磁現象の諸法則を総合し、数学的な補正を加えて、矛盾のない体系を作ることに成功したが、その結果として、上述の波の存在が自動的に帰結されることになったわけである。そしてこの波の伝播速度が、たまたま光の速度と一致することから、光がマックスウェルの電磁波であるにちがいないと推論され、やがてそれは実験的にも確立されるにいたった。

　マックスウェルの電磁理論は、場の理論と呼ばれているものの最初の例である。今日では、すべての力は、力の場という量で記述されると考えられている。それは簡単に言えば、ある時空の

一点に（ある場所で、ある時刻に）試料を置いたときにそれに働く力の大きさを決めるもので、すなわち力の場とは、時空という一種の媒質の各点における性質を反映するものである。

これに対して、ニュートンの重力理論では、二つの質点の間の重力は、それらが直接に働き合う「遠隔作用」の結果であると考えられていた。しかしこれを力の場として扱うことも可能で、第一の質点がその周囲の空間に影響して重力の場を作り、それが次に第二の質点に力を及ぼす、と解釈してもよい。いわゆる重力のポテンシャルがこの場である。

場の立場と、遠隔作用の立場とは右の例が示すように必ずしも相容れないものではないが、マックスウェルの電磁場の理論に至って、電磁力が有限の速度で「伝播」することがわかってくると、媒質のもつ力の場という考え方の方が当然有力になる。マックスウェルの方程式には、この媒質の性質を規定する重大なカギが含まれている。光の速度が座標系によらないというのはその最も著しいものであろうが、このカギを見抜いて、それが電磁場のみならず、すべての現象にもあてはまるべきだと主張したのはアインシュタインであった。すなわち彼の「特殊相対論」によれば、時空の性質がマックスウェルの方程式を規定したのであるから、もしほかの場が存在すればそれもやはり同じ制約に従わねばならない。

アインシュタインは質点の運動が特殊相対論に従うことを示したのだが、量子力学では粒子も波動の性質をもつ。それを記述する波動関数というものは一種の場と考えてもよい。波動関数は

シュレーディンガーの方程式に従うが、これはニュートンの古典力学を量子力学に翻訳したものだから、特殊相対論の枠の中には入っていない。すなわちシュレーディンガーの方程式は非相対論的な量子力学にとどまっているものである。

相対論的量子力学

それでは相対論的な量子力学はどんな形をとるであろうか。シュレーディンガーの方程式にとって代わるものは何であろうか。この答はディラックにより最初に与えられた。電子の波動関数を規定するディラック方程式というのがそれである。

ディラックの方程式はシュレーディンガーの方程式にはなかった新しい性質をいろいろ含んでいる。例えばディラックの電子はスピンという属性をもっていて、それはある意味ではコマのような自転を表すものとも考えられ、また光の偏光のような内部状態を表すものと考えてもよい。いずれにせよスピンは電子の固有角運動量に相当し、その大きさはプランクの単位（プランク定数$\hbar$）で½、その向きは上向き（＋½）と下向き（－½）の二つの独立な状態しかない。ただしどの方向を上と決めるかはもちろん勝手で、光の場合に偏光を互いに垂直な二つの方向に分解するのと同じ事情である。

電子のスピンはディラックが初めて導き出したのではなく、それ以前に原子のスペクトルなど

を説明するために仮定されていたものであるが、ディラック方程式から自動的に出て来たことは、相対論的量子力学の輝かしい勝利であった。

　スピン以外にもう一つディラック方程式のもたらした新しい結果は「反電子」または普通「陽電子」と呼ばれている粒子の存在である。すなわち電子の状態に対して、逆の電荷をもった陽電子の状態もディラックの波動関数の中に含まれている。電子（e^-またはe）と陽電子（e^+またはe）がぶつかれば、散乱もするが、また両方が消滅していくつかの光子（γ、ガンマ）などに変わってしまうことも可能である。反応式で書けば

$$e^- + e^+ \longrightarrow e^{-\prime} + e^{+\prime}$$

$$e^- + e^+ \longrightarrow \gamma + \gamma' \quad \text{など}$$

　これらの反応はもちろん逆にも進む。すなわち十分なエネルギーがあれば正負の電子の対を新しく創

ディラック　P. A. M. Dirac
（一九〇二〜一九八四）



イギリス生まれ。量子力学の形成に貢献した主要人物の一人。天才的なタイプの人で、その仕事は数学的な美しさと深遠さにおいてユニークである。電子を相対論的に記述するディラック方程式は彼が二六歳のときに発見した。この式に負のエネルギーの解があるという困難を救うため、負エネルギー電子＝正エネルギー陽電子という解釈法を考え出し、いわゆる反粒子の存在を予言した。一九三三年ノーベル賞受賞。その後、場の量子論の発展に多くの寄与を

り出すことができる。陽電子はアメリカのアンダーソンによって実験的に見出され、ディラック方程式のみごとな裏付けとなった。しかしわれわれの日常世界には電子ばかりで陽電子は滅多に見当たらないのはちょっと不思議と思われるだろう。実は陽電子が存在しても、電子に出会えば対消滅してしまうから、というのが普通の答だが、それでもこの世界に電子の方がこんなに残っているのはなぜだろう。同じことは陽子と反陽子についても言えるが、この問題を追究すれば結局宇宙の起源にまでさかのぼらねばならない。しかしそれは後で論ずることにしよう。

さて話を相対論的量子力学の一般論に進めよう。ディラック方程式のもつ二つの特徴はスピンと反電子の存在であることを右に説明したが、ディラック方程式が唯一の相対論的方程式ではない。電磁場を記述するマックスウェルの方程式もその一つである。量子論では古典的な場も粒子の性質をもち、また古典的な粒子（質点）も場（波動）の性質をもつから、両方を統一して取り扱わねばならない。そしてその結果、次のような事情が成立することがわかっている。

して来たが、最近重要な話題となったのは一九三一年に発表された単磁極（モノポール）の理論である。彼はディラック方程式によりスピノールの数学を、モノポールによりファイバー束の数学を、数学者とは独立に創造した。モノポールの論文の中で述べているごとく、「数学的にエレガントで美しい理論を自然が採用しないはずがない」というのは彼の信条であった。

電子や光子のような素粒子のもつ基本的な属性は、質量、スピン、電荷であるが、これを決めれば適当な波動方程式でその運動を記述することができる。そして一つの粒子に伴って一般に反粒子も存在せねばならず、粒子と反粒子はお互いに反対の電荷をもつ。ただし粒子＝反粒子 という場合もある。例えば電磁波の量子、すなわち光子はその場合に属する。このときは電荷はもちろん0でなければならない。しかし光子の電荷が0であることと、荷電粒子が光子（電磁波）を放射することとを混同してはいけない。前者の意味は、光自身が光の源とはならないということである。

量子の質量は、もちろんそれぞれの素粒子に固有のもので、特に0であってもよい。その場合は粒子はいつでも光速度で走る。光がその典型的な例であるが、その他に重力の量子（グラビトン）も、まだ観測されてはいないが0質量であるはずだ。物質粒子の中ではニュートリノの質量が0だと今まで一般に考えられていたが、最近これが疑わしくなってきた（二九四ページ）。

次にスピンに移ろう。電子のスピンは前に述べたように（$\hbar$の単位）$\frac{1}{2}$で、上向き（$+\frac{1}{2}$）と下向き（$-\frac{1}{2}$）の二種の状態をもつ。光子の場合には、そのスピンは1だと言われる。前にスピンは光の偏りのようだとたとえたが、実際に光の偏り＝スピン なのである。ただし光を止めることはできないから上向き、下向きとは言えない。光子の走る方向に沿って右巻きと左巻きの円偏光のもつ角運動量がそれぞれ±1で、これが電子の二つのスピン状態に対応する。

それではスピンは½か1だけかというとそうではない。原則的には、0、½、1、3/2、……といくらでもありうる。一般にスピンがjならば、質量をもつ粒子のときには$2j+1$個の状態が存在し、スピンのある方向への成分、$j, j-1, j-2, \ldots\ldots, -j$だけの値をとりうる。例えばスピンが1ならば成分1、0、−1である。質量のない光子のような場合、$\pm j$の二成分しかない。

ただしここにパウリのスピン統計の法則というものがあって、0、1、2、……など整数のスピンと、½、3/2、……など半整数のスピンとは全く異なるグループなのである。簡単に言えば半整数スピンの粒子は電子のように、古典的にも粒子として存在し、いわゆる物質の構成要素となる。

これに反して古典的に波または力の場として現れる電磁場のようなものの量子は整数スピンをもつ（しかし逆が成り立たぬことはあとで述べよう）。

もう一つの区別は量子統計に関するもので、スピン半整数の粒子はフェルミ統計に従い、整数のものはボース統計に従うと言われる。これも簡単に説明すれば、フェルミ統計では二個の粒子が同じ状態を同時にとれない、例えば同じ場所を占めて同じスピンの向きをもつことができない。つまり多くの粒子が同じ状態に重なり合って存在できないわけで、われわれの常識的な「物質」の観念にあてはまる。

ボース統計の場合には逆に同じ状態をとりうる粒子の数に全く制限がない。これは同じ形の波

をいくつも重ね合せれば振幅がいくらでも大きくなることと解釈できよう。だから光子一個は非常に小さなエネルギーしかもっていなくても、それらがたくさん集まれば日常現象に電磁波として観測できるのである。これの著しい例はレーザーで、完全に同じ状態の莫大な光子の数が集まって作られた光だと考えてよい。

フェルミ統計に従う粒子はフェルミオン（フェルミ粒子）、ボース統計に従う粒子はボソン（ボース粒子）と呼ばれているのでこれからこの用語を使うことにしよう。前者は有名なエンリコ・フェルミ（一二一ページ）、後者はインドの物理学者S・N・ボースにちなんだものである。

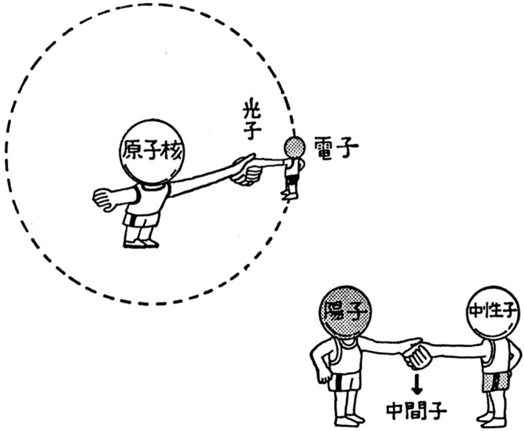
電子と光子のほかに素粒子として核子やその集合の原子核が存在するが、今までに述べた一般原則はこれらにも適用される。例えば核子、すなわち陽子と中性子はスピン½のフェルミオンで、それらの反粒子、すなわち反核子の相棒とともにディラック方程式で記述される。これに対し陽子と中性子が結合した重水素核は、スピン1のボソンである。しかしこの場合は古典的にはやはり物質粒子であって、力の場ではない。だからフェルミオンとボソンのちがいを、粒子か場かで区別するのは当を得ていない。ただし、これは重水素核が複合粒子であって、本当の素粒子でないからだとも言える。例えば電子と陽子が結合した水素原子もこの意味ではボソンである。

中間子に至る発想

それでは光子以外に素粒子としてのボソンがあるだろうか。もしあればそれは何かの力の場としても現れるはずである。例えば核力はどうだろう。前の一般論では、ボソンも質量をもってよいが、質量をもったスピン0のボソンに対応するクライン－ゴルドンの波動方程式というものを書いてみると、これは到達距離の短い力の場を表すことがわかる。すなわち到達距離はボソンの質量に逆比例し、そのコンプトン波長と呼ばれるものに等しい。

核力はまさにこのような性質をもっているものである。だから核力の場はクライン－ゴルドンの波動方程式で記述され、その量子は質量をもったボソンとして存在するのではないか。核力の到達距離はだいたいわかっていて、原子核の大きさ、10^{-13}センチメートル程度である。これから逆算すると核力の場の量子の質量は電子の二〇〇倍（または核子の一〇分の一）程度となる。これが湯川博士の推論であった。当時はこんなボソンは知られていなかったが、博士は大胆にもその存在を予言し、それを中間子と名づけた。核子と電子の中間の質量をもつという意味である。

湯川理論が出たのは一九三五年である。量子力学が生まれた一九二五年から一〇年たっている。その間に原子核に関する知識も進歩し、陽子と中性子が核の成分であることもわかっていた。また陽電子も発見されていた。だから湯川理論が出てもよい時期であったことは確かだが、もっと早く出てもよかったではないか。



電気的には引き合わない陽子と中性子を結びつけているのは何か？

後になってからこんな批評は誰でもできると言われるかもしれない。けれどもその当時他の人々がどう考えていたかを検討してみるのもよい教訓になるので、ここで一九三〇年代の前半の世界にいると想像してみよう。

一九三〇年代

原子の構造、すなわち原子内部の電子の運動を記述することに成功したのは量子力学の大きな勝利であったが、量子力学の適用範囲はどこまで及ぶのであろうか。今ここに原子核というさらに小さな複合体が存在し、それは核子の結合したものであるようだが、どんなメカニズムによるものか全くわからない。原子の問題を解くのに量子力学という新しい力学を必要としたように、原子核の問題を解くにはさらに新しい力学が必要ではなか

ろうか。これが第一の疑問である。

次に相対論的量子力学からいろいろな粒子の存在が可能であると言ったが、反粒子なるものの解釈もまだよくわかっていない。陽電子は見つかったが、反核子はどうだろう。この世界には陽子、中性子、電子の粒子（フェルミオン）と、電磁場、重力場しかないように見える。特に中間子のような質量をもった粒子は見当たらないではないか。いったい相対論的量子力学はどこまで信頼できるのか。これが第二の疑問であろう。

湯川博士の偉さを特徴づけようとすれば、それは博士が右のような疑問をおし切ったところにあると、私は思う。簡単に言えば、二〇世紀に生まれ、輝かしい成功を収めた二つの美しい理論体系、すなわち相対論と量子論の真実性、普遍性を信じ、それから出る帰結を素直に原子核に適用したことであ

湯川秀樹　（一九〇七〜一九八一）



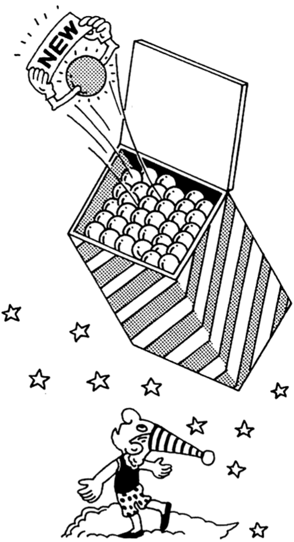
東京に生まれ、京都で育った（本書の人物欄には東京生まれとニューヨーク生まれがやたらに多い）。父は地理学者小川琢治。学者の家系に属し、幼少のころから漢学などの素養も身につけた。京都大学の学生時代は、ちょうどハイゼンベルク、シュレーディンガーなどによる新しい量子力学が形成された時期で、日本では先生もなく、主に自分で勉強せねばならなかったであろう。この独立自主の気概をもって湯川博士は一九三四年、二七歳のとき中間子論を着想し、ヨーロッパの先進学者を出し抜いてしまった。一九四九年、日本人として最初

る。物理現象がすべて美しい法則で記述できるとは限らない。また一つの美しい法則が理論的に可能であれば必ず自然に適用されるのではもちろんない。けれども正しくて美しい法則体系というものの適用性は、最初の予期以上に広く深いものである。だからこのような体系から出てくる帰結は一見自然に反するようなものでも真剣に受けとらねばならない。

　そのよい例はアインシュタインの一般相対論から帰結されるブラックホールであろう。ブラックホールはこの書の話題ではないから深入りするつもりはないが、時間も空間も極端に歪んでしまって光も外へ逃げられぬというものすごい重力の働く世界の話は、クォーク以上に神秘的で、大いに大衆の好奇心をそそるようだ。これは最近の天文学の進歩によって、われわれの銀河系の中にブラックホールが存在するらしいという間接的な証拠がいくつか見出されたから流行の話題となったのだが、もともとは（一九一六年）アインシュタインの重力場の理論（一般相対論）が出た直後にその方程式の解としてシュワルツシルトによって理論的に見出されたものなのである。

のノーベル賞受賞。その後も素粒子論京都グループのリーダーとして多くの学者を養成された。戦後には、場の理論の欠陥を救う目的で非局所場なるものを提唱されたが、その概念と名前は現在広く通用している。

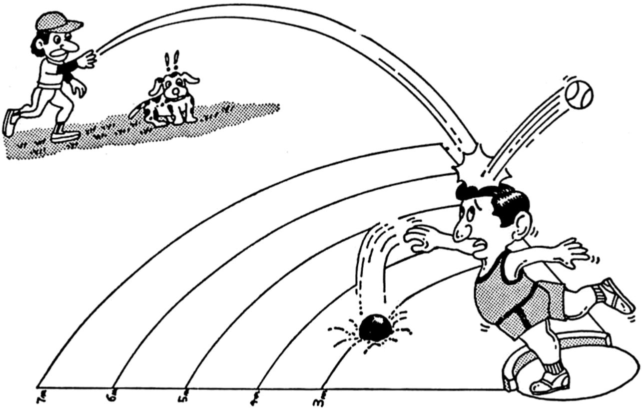
6　新粒子の出現



クーロン型と湯川型

前章ではじめた湯川理論の話はまだ終わっていない。根本的な着想を紹介しただけだ。すなわち核力は相対論的量子力学で記述されるべきで、そうならば中間子というボソンも存在すべきだと言ったのである。しかしこれだけでは内容を理解しにくいであろうし、また解明すべき問題もいろいろ残っている。例えばなぜ中間子が日常世界に見当たらないのだろうか、などの疑問もその一つであろう。

粒子に働く力の場を量子論的に説明するときには次のような考え方がよく使われる。例えば二つの電子の間の電磁力（クーロン力）は電磁場の量子、すなわち光子をやりとりすることによって生ずる。いわば電子同士がキャッチボールをし、光子がそのボールであるわけだ。光子の質量が0である（すなわち光速度で走る）ことは力の到達距離が長く、クーロン型（$1/R$）のポテンシ



重いボールは遠くに届かない

ャルであることに対応する。

ところがもし質量をもったボソン、つまり重いボールでキャッチボールをしたとすれば、力は遠くへはとどかない。このときのポテンシャルは「湯川型」になる。数式で書けば $e^{-\mu R}/R$ で、遠くへ行けば指数的に弱くなるものである。ここで μ は粒子の質量に比例する量で、$1/\mu$ がいわゆるコンプトン波長である。すなわち到達距離はその量子のコンプトン波長に等しいと思ってよい。なぜかような形のポテンシャルになるのかは、残念ながら微分方程式の知識なしには完全に説明できないが、ハイゼンベルクの不確定性原理を引き合いに出せば、ある程度納得できる。

いま交換されているボソンは「実の」(real)粒子ではない。というのは、はじめの状態がボソンの質量を作るだけのエネルギーをもっていないか

らである。このような粒子は「仮の」(virtual)粒子と呼ばれ、キャッチボールの間だけ一時出現してまたなくなるはかない存在である。不確定性原理によればエネルギーの不確定性ΔEと時間の不確定性ΔTとは反比例する

(1)　$\Delta E \times \Delta T \geqq \hbar$ (プランク定数)

ので、寿命ΔTが十分短ければエネルギーの不確定が大きくなり、仮の粒子を作れるのである。しかしその粒子はΔTの時間にたかだか $\Delta T \times c$ (光速度) の程度しか動けない。ΔEを静止エネルギー mc^2 ととれば到達距離が $\hbar/mc = 1/\mu$ となる。これがコンプトン波長である。

これで湯川型の力の到達距離は一応説明したが、このような力の符号、すなわち斥力であるか引力であるかは、場の源のもつ「電荷」の符号による。電磁場のときにクーロン場が電荷に比例したように、湯川型の場にも、その源に特有の定数が考えられる。一般にこのような定数を結合定数と言い、その大きさが力の大きさを決める。核力が電磁力に比べて非常に強いのはその結合定数がずっと大きいからである。電磁場の結合定数は単位電荷eであり、ディメンションのない数に直せば、有名な微細構造定数 $e^2/\hbar c = 1/137$ がその大きさの目安を与える。これが1に比べてずっと小さいので、電磁力は比較的弱い力だと考えられているわけである。

核力は電磁力に比べて強いから、中間子の結合定数は $e^2/\hbar c$ よりも大きいはずである。だいたい$1/10$ないし1のオーダーであることがわかっているが、結合定数以外に、中間子のスピンの値

も核力の性質を大いに左右する。例えば光子のようなスピン1の中性粒子を交換するときは同じ結合定数（すなわち電荷）をもつ粒子の間の力は斥力だが、スピン0の粒子を交換するときには引力になる（ただしその説明はむずかしいのでやめておく）。

湯川博士の最初の仮説では、中間子はスピン0で電荷±1の粒子だとされた。電荷をもったボールでキャッチボールをすれば、当然二粒子の間に電荷の交換が起こる。いま陽子が中性子に向かって電荷+1の中間子を投げたとすれば、陽子は中性子に、中性子は陽子に変わる。すなわちこのような過程を許せば、陽子とか中性子とかはアイデンティティを失ってしまって、これらは単に核子の二つの異なった状態にすぎなくなるのである。またこの場合には陽子同士や中性子同士では一個だけのボールではキャッチボールができない。

それはともかく、陽子と中性子のアイデンティティがなくなったのは重大な意味をもつ。もともとこの考えはハイゼンベルクにはじまるものだが、すでに3章で述べたように陽子と中性子が電荷以外の点では非常に似ているので、核力の問題に関しては細かいちがいをまず無視して、同じ質量の粒子だとしよう。しかし両者を区別するため何かの目じるし（量子数）が必要である。スピンが上向き、下向きの二種類あるのにちなんで、アイソスピンというものを考え、陽子と中性子はそれぞれアイソスピンの上向きと下向きの状態だとする（アイソスピンは「同じ形」を意味するアイソトープとスピンを組み合わせた言葉である。ただし原子核のアイソトープは同位元

素のことで、同じ原子番号をもち質量数のちがう原子核をさす《三六ページ》。だからあいにく定義がアイソスピンと逆になっている)。すなわち核子のアイソスピンの大きさは½で、その向きによってZ方向の成分が±½の二種類あることになる。これを記号で $I = 1/2,\ I_z = \pm 1/2$ と表す。

現在の知識に基づけば、核力は単に一種類の中間子によるものではなく、実はいろいろな質量、スピン、電荷をもった中間子の交換による複雑な過程である。これらの中間子は総括してメソンと呼ばれており、本書でもこの名を使うことにする。その中でも一番軽いメソンの作る力は一番到達距離が長いので重要な役割を演ずると考えられる。これがすなわち最初に発見されたパイオン（π）で、湯川理論の実証となったものである。

パイオン

パイオンの質量は電子の二七〇倍で、スピンは0だが、湯川のはじめの予想とは少しちがってパリティがマイナスというものである。パリティとは空間反転に関する性質で、「鏡に映して見た」とき、あるいは右手座標系から左手座標系に移ったときに場（ポテンシャル）が符号を変えなければプラス、変えればマイナスとする。

またパイオンのもつ電荷については、±1、0と三種類ある。だから核子が電荷を交換する場合

も、しない場合もあり得て、その結果として二つの核子の間の力はそれぞれのアイソスピンの向き、つまり陽子か中性子かにこだわらない対称的な性質をもっている。三種のパイオン（π^0、π^+、π^-）についても同様で、パイオンのアイソスピンは$I=1$（$I_z=1, 0, -1$）と考えることができる。これらのパイオンは粒子同士が十分高いエネルギーで衝突したときに「実の」粒子として作られる。例えば

$$\text{(2)}\qquad \mathrm{p}+\mathrm{p}\longrightarrow \mathrm{p}+\mathrm{n}+\pi^+$$
$$\mathrm{p}+\mathrm{p}\longrightarrow \mathrm{p}+\mathrm{p}+\pi^0$$

のような反応である。パイオンの質量はエネルギーに直しておよそ一四〇MeVなので、核子の反跳を考慮に入れて、二八〇MeV以上のエネルギーのサイクロトロンが必要である。しかしこのようにして作られたパイオンは安定な粒子ではない。実は$\pi^{\pm}$はミューオン（μ）とミュー・ニュートリノ（ν_μ）にこわれ、π^0は二つの光子（γ）にこわれてしまう。

$$\text{(3)}\qquad \pi^+\longrightarrow\mu^++\nu_\mu,\qquad \pi^-\longrightarrow\mu^-+\bar{\nu}_\mu$$
$$\pi^0\longrightarrow\gamma+\gamma$$
（$\bar{\nu}$はνの反粒子、すなわち反ニュートリノを示す）

その寿命は前者の場合10^{-8}秒、後者の場合10^{-16}秒という短いものである。湯川メソンが世界にうようよしていないのはまさにこのためである。

湯川博士は、メソンが電子とニュートリノにこわれると仮定され、これでもって中性子のベー

タ崩壊を説明しようとされた。すなわち、

$$(4)\quad n \longrightarrow p + \text{“}\pi^-\text{”}, \quad \text{“}\pi^-\text{”} \longrightarrow e^- + \bar{\nu}$$

ここで“π”は仮のパイオンで、ベータ崩壊の中間段階にあたる。ところが実際においては(3)式のごとくパイオンはまずミューオン（μ）とミュー・ニュートリノ（ν_μ）にこわれ、次にミューオンがベータ崩壊するという二段階をふむのである。

$$(5)\quad \mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$
$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

ここでν_μとν_eとはそれぞれミューオンと電子（e）の相棒となるニュートリノで、異なったものである。

このミューオンは湯川理論が出た後（一九三六年）アンダーソン（前出の陽電子の発見者）たちにより宇宙線の中で発見され、ただちに湯川のメソン、すなわちパイオンだと解釈されてしまった。これは無理からぬ話である。パイオンもミューオンも質量があまりちがわない（ミューオンの質量はパイオンの¾である）。それに湯川メソンは核力を説明するために存在理由があるが、いったいミューオンは何の役に立つのかわからない。全く無用の長物のようだ。

ミューオンが見つかったのは、地球の外から来る宇宙線（陽子）が上空で空気の核と衝突してパイオンを発生し、それがすぐこわれてミューオンとなって下界に降って来たからである。ミュ

ーオンがさらにこわれてしまわないのは寿命がパイオンより一〇〇倍も長い（しかも速く走れば相対論的効果のためいっそう時間がのびる）のと、ミューオンが電子と同じレプトン族なので大気物質と強い相互作用をしないからである。

しかしこの二段階の過程の存在を知らないと、現象の解釈においてすぐ矛盾にぶつかってしまう。陽子がパイオンを空気の希薄な上空で十分たくさん作るためには強い相互作用が必要だ。その典型的な反応は、

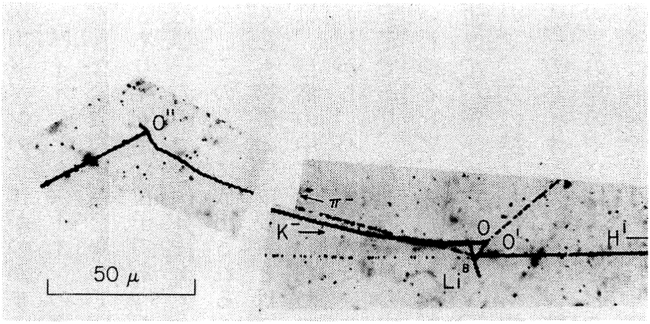
$$p_1 + p_2 \longrightarrow n_1 + \pi^+ + p_2 \qquad (6)$$

これは陽子 p_1 が空気の原子核の中の陽子 p_2 とぶつかって、その衝撃により π^+（プラス電荷のパイオン）を生んで中性子 n_1 に変わることを意味する。

しかしそうならばその逆過程、すなわち π^+ が原子核の中の中性子に吸収される $(\pi^+ + n \longrightarrow p)$ 過程も同じ率で起こるはずで、下界までなかなか無事に到達できない。

二メソン仮説からミューオンの発見へ

この謎は物理学者の頭を数年なやませたが、最初に正しい解答を考えついたのは谷川安孝と坂田昌一の両博士である。特に坂田、井上健の二メソン仮説と呼ばれているものは、だいたい真実に相応している。しかし戦時中に出た二メソン説は長い間、人の注目をひかなかった。パイオン



6.1 エマルジョンの中でとらえた粒子の軌跡の一例
(写真／Prof.Levi-Setti, "IL NUOVO CIMENTO"より)

が実際に発見されたのは戦争後の一九四七年である。イギリスのパウエルのグループは感度の高い写真乾板を作ることに成功し、それを宇宙線にあてた。現像された乳剤(エマルジョン)を顕微鏡で検査した結果、宇宙線の陽子がその中に残した軌跡を発見した。すなわち彼らは

$$p+Z\longrightarrow\pi,\qquad \pi\longrightarrow\mu,\qquad \mu\longrightarrow e$$

という連鎖反応をみごとにとらえた(Zは原子核の意味)。比較的エネルギーの低いパイオンが出てきて運よく乳剤の膜の中を平行に走る間にエネルギーを失って止まったあとミューオンにこわれ、さらにミューオンも同じような過程をたどってから電子と二つのニュートリノにこわれる(ニュートリノはもちろん軌跡を残さないが)。

一般に軌跡の濃さは粒子が物質原子をイオン化する能力で決まるもので、これは粒子の速度が高いほど弱くなり、光速度近くで走る粒子では最低の極限値に達する。このような粒子まで全部感光させることを可能にした技術の進歩によって

湯川メソンの正体がつかまえられたのである。

パイオンとミューオンの発見は素粒子に対する従来の観念をがらりと変えたという点で非常に大きな象徴的意義をもっている。それまでの素粒子はわれわれの日常世界にある物質の構成要素であり、安定な粒子であった（不安定なものが基本粒子だというのはおかしいではないか）。ただしその中でも例外はある。中性子は原子核の中では安定だが、単独では陽子にベータ崩壊する。このときに放出されるニュートリノはその当時はまだ仮説の域を脱していなかったが、少なくとも物質の構成要素とは言えない。その意味ではラジウムなどの発見にはじまるベータ放射能は、自然の中にまだわれわれの理解できない原理がかくれていることを暗示しているようだ。

しかし、パイオンとミューオンの出現によって、例外はもはや例外でなくなった。どちらも不安定であり、普通の物質の中には見出されない。ミューオンは重い電子のようなもので、現在のいわゆるレプトン族の一員だが、なぜこんなものが存在するのだろう。特にレプトン族はごく最近まで、電子、ミューオン、電子ニュートリノ、ミュー・ニュートリノしか知られていなかったので、この謎は非常に神秘的であった。

一方パイオンの存在は、核力という強い相互作用が別に神秘的なものではなく、相対論的量子力学の枠の中にはまることを示した。しかし、パイオンが核力を媒介する唯一の粒子だろうか。自然は単純であるべきだとの立場が「自然」ならば、当然パイオンが唯一のものであろうし、当

時の物理学者はこの仮定のもとで核力などを詳細に説明するために大きな努力を費やした。

しかし実際はどうなったかというと、核力がなかなか説明できないのみならず、パイオンはメソン族の最初の一員にすぎず、もっと得体の知れないメソンやバリオンが続々と登場してきたのである。その意味では、われわれが知っている原子核というものは、たまたま安定なハドロンにすぎない。

V粒子の劇的な登場

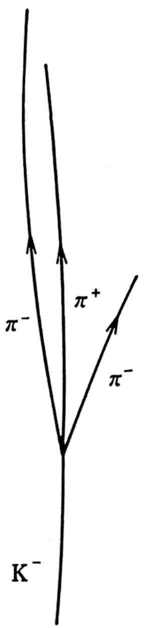
パイオンが登場して間もなく、V粒子と言われるものが宇宙線の中でまた発見された。写真の乳剤の中ではなく、昔ながらの霧箱の中で、折れ釘のような軌跡を残すのでVと名づけられたわけだ。パイオンがミューオンに変わるときにも同じように軌跡が折れるが、V粒子はもっと質量が大きく、種類もただ一つではないらしい。

荷電粒子$V^{\pm}$が別の荷電粒子と中性粒子にこわれる場合、中性V^{0}粒子が二つの荷電粒子の対にこわれて逆V字形に見える場合、一つの$V^{\pm}$粒子が三つの荷電粒子にこわれる場合などいろいろで、こわれたあとの粒子自身がパイオン、ミューオン、陽子などであるらしい。さらに目立つのは、V粒子が二つ同時に写真に写る例が多いことである。いったいこれらの現象をどう解釈したらよいだろうか。

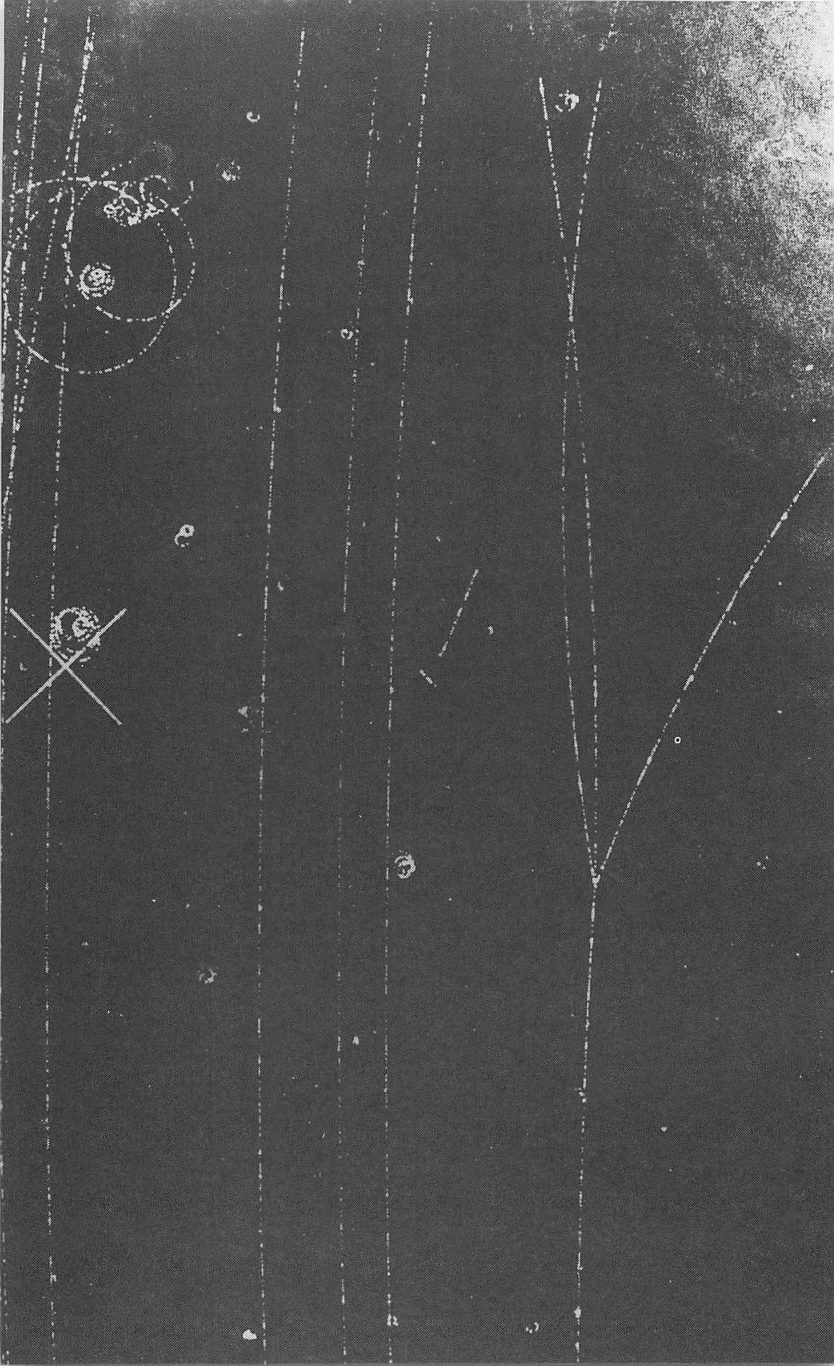
このパズルは物理の問題としては典型的なものと思うが、私自身もその当時大阪市立大学にいて、同僚たちと頭をしぼった思い出があるので、それをここに紹介しておこう。V粒子の見られる割合は宇宙線の起こす反応としては極めて稀である。二つのV粒子が同時に見られる確率はそれらが独立ならばほとんどないはずだ。したがって実際にV粒子の対がひんぱんに起こるのは、一つの反応でそれらが同時に作られたものと見るべきである。いや、むしろ同時に作られる必要があったと見るべきである。そうでなければ前の理屈に従って一つだけV粒子を作る反応の方が圧倒的になってしまう。しからばなぜ対発生が必要なのだろう。

ここで思い出すのは1章および2章に述べた保存則のことである。すなわち反応のもつ規則性から何か保存量の存在が推定される。例えば電子（e^-）と陽電子（e^+）の対の発生は可能だがe^-

K^-（またはτ）の崩壊（$\tau^- \to 3\pi$）



6.2　V粒子
（写真／Prof. Levi-Setti）



とe^-、またはe^+とe^+が対発生しないのは電荷の保存則による。だからV粒子の場合も何か新しい保存量（量子数）をもっているのではなかろうか。

この新しい保存量はゲルマンがストレンジネスと名づけて以来、その名が通っているので、これからストレンジネスと呼ぶことにする。つまり非常に珍しい粒子だという意味である。

そこで宇宙線の陽子が物質と衝突して、正味のストレンジネスが0の系から正負のストレンジネスをもつ粒子の対が作られる。しかし実験によれば両方のV粒子が同じ種類とは限らないらしい。片方のV粒子が陽子にこわれることもあるので、陽子より重いフェルミオンのV粒子と、陽子より軽いメソン的なV粒子が存在するようだ。実験で必ず対が観測されるとは限らないのは、片方がこわれずに霧箱を素通りするとか、他の原因で見落とされるからであろう。こんなことはざらにあるので別に心配する必要はない。

ところでいったん作られたV粒子はどうなるだろうか。もしストレンジネスが保存されれば、他の粒子にこわれても、ストレンジネスはそれらに受けつがれて消滅することはない。普通の物質は仮定によりストレンジネスをもたぬから、それに吸収されることもできない。しかしV^0粒子の中には$\pi^\pm$の対にこわれる例がある。パイオンはストレンジネスをもたぬことになっている。観測にかからぬ中性の粒子がパイオンとともに放出されれば矛盾はないが、$\pi^\pm$のエネルギーと放出角度の関係から二体崩壊であることが結論される。

あらゆることを試みる

ここでまた行きづまってしまった。ではどうしたらよいだろうか。これを救う一つの道は今せっかく仮定した保存則を破ることである。すなわち保存則は厳密なものではなく、多少例外があるとしよう。非常にオポチュニスト的で、厳格な論理を重んずる物理学者のやるべきことでないように聞こえるが、保存則と言わず選択則と言えば、これに似た例はいくらも見られる。しかしストレンジネスが電荷のような量であると考えて出発したのだから、たしかに不愉快である。けれども研究者はあらゆることをやってみなければいけない。そこでこの仮定を採用してみるとすぐいろいろな御利益があることがわかる。

まずV粒子の崩壊は「ほとんど」禁止されているから、V粒子の寿命は比較的長いはずだ。比較的と言うのは不確定性原理から期待される時間に比べて、という意味である。すなわちV粒子の質量、または崩壊の際に二次粒子の運動エネルギーに変わる部分（Q量と呼ばれる）などを目安にとって、前述の式 $\Delta E \times \Delta T \geqq \hbar$ に代入すれば ΔT は 10^{-23} 秒程度で、その間に光速度で走っても 10^{-13} センチメートルしか動けない。すなわち原子核の大きさ程度の距離である。これは全く禁止則がないときの自然な時間のスケールであり、このような粒子は核力キャッチボールのときと同じように「仮の」粒子にすぎないとも言える。

実際のV粒子の寿命はこれに比べて問題にならぬほど長い。霧箱の壁で発生して、箱の中を何センチメートルか走って崩壊するのだから寿命は少なくとも10^{-10}秒程度でなければならぬ。パイオンの寿命10^{-8}秒、ミューオンの寿命10^{-6}秒よりは短いが、オーダーとしてはむしろこの方に近い。

そこで思いつくのは、パイオンやミューオンの崩壊がベータ崩壊の一種であると考えられていることである。特にミューオンの崩壊は中性子のベータ崩壊と非常に類似しており、フェルミのベータ崩壊の理論というものをそのままミューオンに拡張すればミューオンの寿命が正しく出ることがわかっている(中性子の寿命が一〇分、ミューオンの寿命が10^{-6}秒と、大きくちがうのはQ値がちがうためで、理論の中の結合定数は同じでよい)。だからV粒子の崩壊もやはりベータ崩壊の一種と考えればよいのではないか。Vの寿命がさらに短いのもQ値がいっそう大きいからであろう。

するとベータ崩壊という、えたいの知れない現象はなかなかバラエティがあるらしい。いずれにせよ、これらは非常に時間的にゆっくりした、すなわち結合定数の小さい反応だと見られる。その上に保存則をあまり重んじない、天邪鬼(あまのじゃく)的な性格をもっている。

ここでわれわれが自然から学んだことをもう一度整頓して書き出してみよう。

(1) 素粒子は日常の物質を構成する粒子だけではなく、もっとたくさんの種類がある。

(2) 力の種類には電磁力と強い力(核力)とがあり、それらを媒介する場の量子が存在する。

(3)　強い力の相互作用をもつ粒子と、もたない粒子の二種がある。すなわち現代の用語でハドロンとレプトンである。

(4)　さらに第三の相互作用としてベータ崩壊などの原因となる弱い相互作用があり、これによってハドロンやレプトンの多くが不安定となる。

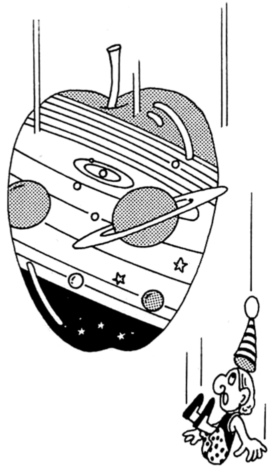
(5)　弱い相互作用は他の相互作用のもつ保存則を必ずしも守らない。

最後の点についてはストレンジネスの非保存を述べたが、その後われわれの知識がふえるにつれて、弱い相互作用はますますこの傾向のはなはだしいことがわかってきた。その中でも有名なパリティの非保存は最も著しい例であろう。これをストレンジネスの保存則といっしょにして次の章でもっとくわしく取り上げることにしよう。

7 素粒子の規則性と保存則

中野－西島－ゲルマンの法則

パイオン、ミューオン、V粒子などが出現したあと一九五〇年代に至って、新しい素粒子が続々と発見され、その数は爆発的にふえてしまった。しかしこれらはミューオン以外は全部ハドロンであり、この傾向は現在に至るまで続いている。ミューオンの次のレプトン、タウ粒子（τ）が登場したのはつい数年前にすぎない。ハドロン族が非常に多いということは、われわれにはかえって都合がよい。そのメンバーの性質を組織的にしらべれば、それらを支配する何らかの法則が見つかるだろう。例えば原子構造の場合は、原子の発するスペクトル線に関する豊富なデータがあったことは量子力学が生まれるときに有力な手がかりになった。もっと昔にさかのぼれば、太陽系にいくつかの惑星があったからこそ、コペルニクスの太陽系モデルが生まれ、またティコ・ブラーエの観測データに基づいてケプラーの法則が見出され、ついにはニュートンの力

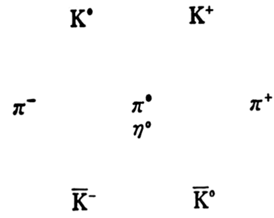


学に到達できたと言えないことはない。そのほかメンデレーエフの元素の周期律や、マイヤー、イェンセン、ズースの原子核の殻モデルなどの例もあげられる。

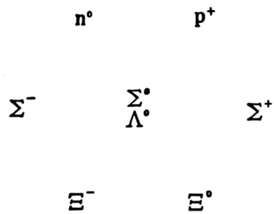
ハドロンの場合に決め手となった規則性は中野‐西島‐ゲルマン（NNG）の法則（公式）と言われているものである。そしてこの法則を自然に説明するためにクォークという仮想的基本粒子が提唱された。ここではしかし事実の紹介からまずはじめねばならない。

V粒子、パイオン、核子などはハドロン族の中で「安定」なメンバーである。ここでカッコ付きの安定性とは、弱い相互作用や電磁的相互作用を無視すれば崩壊できないと考えられることを意味する（電磁的な崩壊の例はπ^0メソン、Σ^0粒子などであまり多くない）。そのためにこれらは比較的寿命が長く、霧箱や乳剤の中で崩壊する現場がとらえられることが多い。これら以外のハドロンの大多数は「不安定」、すなわち強い相互作用によっても本質的に不安定で、それらは少数の「安定な」ハドロンに速やかに崩壊する。いわば一時的な励起状態である。「安定」なハドロンは例によってメソンとバリオンのグループに分かれ、そのメンバーは九二ページの図のとおりである。

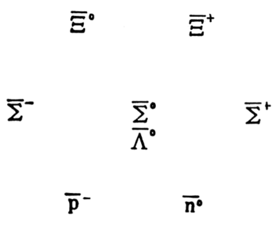
この図は中野‐西島‐ゲルマンの法則を取り入れて整頓してある。まず目につくのは、メソン、バリオン、反バリオンがいずれも八個の組をなしていることである。後にゲルマンが仏教の教えにちなんで八つの道(eightfold way)と呼んだのはこのためである。ここでヨコ軸はアイソ



7.1　メソン族



7.2　バリオン族



7.3　反バリオン族

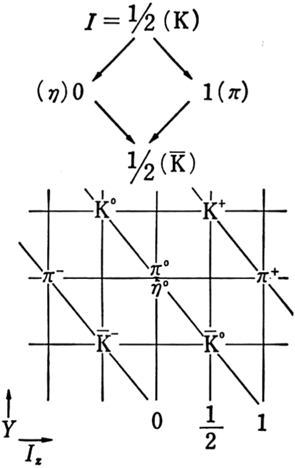
スピンのz成分I_z、タテ軸はストレンジネスSまたはハイパーチャージ（超電荷）Yという量子数である（メソンでは$Y=S$, バリオンと反バリオンではそれぞれ$Y=S\pm1$と定義される）。ところで電荷（肩の添字で示す）の方は図からわかるように右上に向かって斜めにふえている。

同じ水平線の上にならんだ一組は一定のアイソスピンIに属する兄弟分で、核子やパイオンの場合についてすでに述べたごとく質量も強い相互作用もすべて似ている。しかしもう少し大目にものを見てやれば、これら八個がみな同じだと言っても悪いことはない。質量は少なくとも同じオーダーだし、相互作用の点でもあまりちがいがない。ただアイソスピンの成分によるちがいと、ストレンジネスによるちがいとでは後者の方がはなはだしいという程度の差があるだけであ

る。

このようなキメの粗い見方は物理学には非常に必要なことで、また人間的に自然な考え方だとも言える。そのおかげで、かげにかくれた規則性も見えてくるし、将来精密な理論を立てるための土台にもなるのである。それでは今の場合の規則性とは何だろうか。

図7・1と7・2から気づくことは、アイソスピンIと超電荷Y（またはストレンジネス）の間に関係があることである。例えばメソンの図を見よう。Kメソンは$I=1/2$，$Y=1$，パイオンは$I=1$，$Y=0$，またη^0粒子は$I=0$，$Y=0$である。すなわちYが1変わればIが$\pm\frac{1}{2}$だけとぶ。これを図で示せば図7・4のようになる。



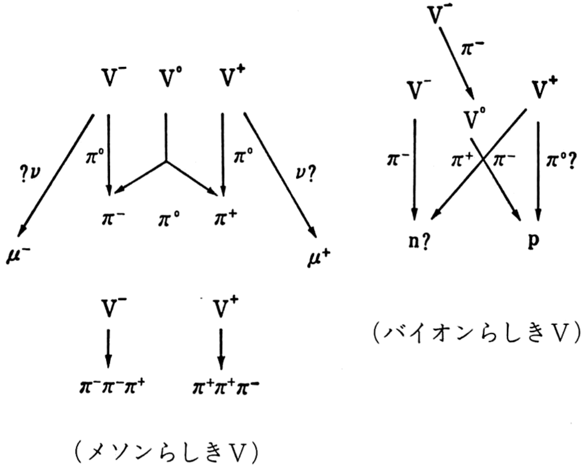
7.4

そして電荷はと見ると、前に指摘したように規則的に右上に進み、したがって電荷QはIの成分I_zとYとで簡単に表せる。

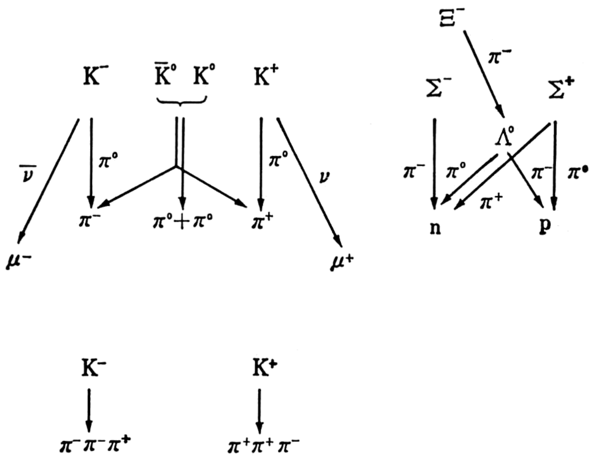
$$Q=I_z+\frac{Y}{2}$$

これが中野‐西島‐ゲルマン（NNG）の公式（法則）と言われるものである。

図式ができ上がってしまったあとでは至極単純


V⁻ V° V⁺
?ν π° π° ν?
π⁻ π° π⁺
μ⁻ μ⁺
V⁻ V⁺
π⁻π⁻π⁺ π⁺π⁺π⁻
（メソンらしきV）
V⁻ π⁻
V⁻ V° V⁺
π⁻ π⁺ π⁻ π°?
n? p
（バイオンらしきV）

7.5


K⁻ K̄° K° K⁺
ν̄ π° π° ν
π⁻ π°+π° π⁺
μ⁻ μ⁺
K⁻ K⁺
π⁻π⁻π⁺ π⁺π⁺π⁻
Ξ⁻ π⁻
Σ⁻ Σ⁺
Λ°
π⁻ π° π⁻ π°
π⁺
n p

7.6

に思われるだろうが、まだどれだけ粒子があるかはっきりわからないときに正しいパターンを見出すのが物理学者の役目でもあり、生きがいでもある。実際、中野－西島－ゲルマンの公式が出る前に知られていた実験事実を図式にすれば図7・5のようになる。

ここで矢印は崩壊の過程を示し、そのとき同時に放出される粒子を傍に記してある。また、V粒子の質量はだいたいわかっているので、それによってV粒子の位置を変えてある。だがこの図だけから前の図7・1、7・2が見えてくるだろうか。いったいこれらのV粒子はその中のどの粒子に相当するかわかるだろうか。読者諸君、考えてごらんなさい（答は図7・6）。

発想のカギ

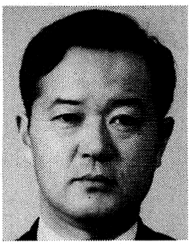
西島和彦、中野董夫とゲルマンが一九五三年に独立に発見した公式は、こんな図をただ眺めていただけでは出てこない。本当のカギは前の章で述べたように、新しい量子数（超電荷）があって、それに従ってV粒子の発生反応が起こるが、崩壊のときは保存則が破れた方がよいという着想から出発し、その上にもう一つ決定的要素を加えるところにある。この要素とは九三ページに説明した超電荷（ストレンジネス）とアイソスピンとの関係、すなわち超電荷Yが変わるごとにアイソスピンIが$\pm\frac{1}{2}$だけずれるという関係である。これを仮定すれば、ストレンジ粒子（ストレンジネスを担う粒子）がパイオンを放出して普通の粒子に崩壊するとき、超電荷のみならずア

イソスピンの保存をも破る。なぜならばパイオンのアイソスピンは1なので、反応の前後で全アイソスピンが半整数だけ変化し、0にはなり得ないからである。

もちろん保存則を二つも破る必要はないとも言えるが、図7・1、7・2を見ると、普通の粒子の中で核子（スピン½）のIは½、パイオン（スピン0）のIは1というふうに、スピンとアイソスピンが同時に整数か半整数になっている。ところがV粒子の方には一見したところではそんな関係がないようだ。しかしひょっとしたらやはり相関があるのではないか、特にV粒子に対しては、型破りに相関を逆にして見たらどうだろう。そのためにはこの図に未知の粒子を適当に補わなければならない。

このような推論の結果としてNNGの公式が生まれ、さらに新しい粒子の存在が予言される。そして

西島和彦（一九二六〜）



戦争の末期から戦後にかけて朝永博士は東京大学にも関係され、新しい素粒子論グループ発生のきっかけを作られたが、西島はそれに属する一人である。新設の大阪市大理工学部に就職したのはストレンジ粒子のデータがどんどん出はじめた頃であった。同僚の中野董夫との共同になる中野－西島の法則はここで生まれた。ゲルマンもアメリカで独立に同じ考えに到達した。その後西島はドイツ、アメリカなどで数年を過ごした後、東大教授、京大基礎物理学研究所所長などを歴任。その他、二種ニュートリノ（ν_eとν_μ）の仮説、いろいろな場の

やがて予言が実証されればNNGの仮説が理論として確立し、物理学者は次の前進をはじめる。めでたしめでたしである。

理論の定理などに貢献している。

では次の前進とは？　NNGの公式ではアイソスピンとの間に関係があるが、なぜ粒子が八個組をなすかは説明しない。この問題は次の章以後にゆずるとして、NNG理論の実証とは単に八個の粒子の存在を確認するだけではないことを示しておこう。NNGの理論の中には強い相互作用がアイソスピンと超電荷を保存するという仮定が含まれている。V粒子が作られる機構は強い相互作用によるのが圧倒的で、崩壊のときにだけ他の相互作用が関与するのであるから、V粒子の発生反応でこれらの保存則をチェックすべきである。超電荷の保存は前に対発生の解釈で述べたが、アイソスピンの保存も取り扱わねばならない。

強い相互作用とアイソスピンの保存

ここに一例としてπpという反応をとってみよう。すなわち$\pi^{\pm}$メソンのビームを陽子の的にあてるのである。NNGの公式（九三ページ）によってアイソスピンは電荷とストレンジネスに関係づけられているから、後の二つの保存を守れば、自動的に前者も保存されるように思われるか

もしれないが、アイソスピンの保存とは、実はこれよりも強い条件、反応の確率（散乱断面積）がアイソスピンの向き（成分）によらないことも含んでいる。

例えば核子のアイソスピンは½で、陽子、中性子のI_zがそれぞれ½と$-$½、またパイオンのアイソスピンは1で、π^+、π^0、π^-のI_zがそれぞれ1、0、-1であるから、パイオンと中性子の散乱のあらゆる組合せを考えればI_zの和は3/2、½、$-$½、$-$3/2だけの可能性がある。すなわち、

$$I_z=3/2 \qquad \pi^+ + \mathrm{p} \longrightarrow \pi^+ + \mathrm{p} \qquad \text{(a)}$$

$$I_z=1/2 \qquad \begin{cases} \pi^+ + \mathrm{n} \longrightarrow \pi^+ + \mathrm{n} & \text{(b)} \\ \qquad\quad \longrightarrow \pi^0 + \mathrm{p} & \text{(c)} \end{cases}$$

$$I_z=-1/2 \qquad \begin{cases} \pi^- + \mathrm{p} \longrightarrow \pi^0 + \mathrm{n} & \text{(d)} \\ \qquad\quad \longrightarrow \pi^- + \mathrm{p} & \text{(e)} \end{cases}$$

$$I_z=-3/2 \qquad \pi^- + \mathrm{n} \longrightarrow \pi^- + \mathrm{n} \qquad \text{(f)}$$

これらの式を、上の半分と下の半分に分けて、上下をひっくり返せば、ちょうどアイソスピンの向きをひっくり返したことになる。したがってアイソスピンの保存則から、この操作で対応する反応は同じ散乱断面積をもつと結論されるのである。

それのみならず、実はもう少し強い制限がつけられる。数学を使わずには説明しにくいので、詳細は述べないことにするが、アイソスピンをベクトルと考えて、長さ $I=1/2$ のベクトル

（核子）と$I=1$のベクトル（パイオン）を加えれば、量子論では$I=1\pm 1/2$すなわち$3/2$と$1/2$の二つの可能性しか生じない。例えば前の式で$I_z=\pm 3/2$の反応は$I=3/2$の場合に属し、$I_z=\pm 1/2$の反応は$I=3/2$と$I=1/2$の状態の混ざったものである。したがって、反応断面積は$I=3/2$と$I=1/2$の二つの場合に関する基本量を適当に組み合わせて表せる。しかしある特定のエネルギーでどちらかのIが圧倒的に大きな断面積を与えることがある。これはこのようなIをもつ共鳴状態があるときに起こるものである。弦楽器などの共鳴と同じことで、特定の振動数（すなわちエネルギー）で二つの粒子がぶつかれば、意気投合してなかなか離れず、準安定な状態を作り出して断面積が大きくなると考えればよい。

πN（パイオン - 核子）散乱において$I=2/3$の共鳴が起きたとしよう。ということは、前の六つの反応は$I=3/2$に対する基本量だけで表せることになり、それぞれの断面積の比はちゃんと定まってしまう。すなわち

$$a:b:c:d:e:f=9:1:2:2:1:9$$

歴史的に有名なπNの3 - 3共鳴状態（現在ではデルタ（Δ））と呼ばれるものは、ハドロン反応で発見された共鳴状態の最初のものである（3 - 3とはアイソスピン$3/2$、スピン$3/2$の状態の意味）。

πNの3-3共鳴状態

一九五〇年のはじめにシカゴ大学で新しいサイクロトロンが動きだした。企画者はフェルミとその協力者H・アンダーソン、サイクロトロンのエネルギーは四五〇MeV、目的はpp散乱のみならず、パイオンを作ってその性質をしらべようというのであった。陽子（p）のビームを適当な的に当てれば、原子核の中の陽子または中性子（n）と反応してパイオンが生ずる。

$$p+p \longrightarrow p+n+\pi^+$$
$$p+n \longrightarrow n+n+\pi^+$$
$$\longrightarrow p+p+\pi^-$$

作られたパイオンの運動エネルギーは0から二〇〇MeV以上までの分布をもつが、これらのパイオンを磁場により分離してとり出し、第二次的なパイオンのビームを作ることができる。パイオンがミューオンにこわれるまでに数メートルは走れるから、パイオンのビームを次の的に当ててπN散乱の実験をする、というのがフェルミグループの計画であった。

この実験の結果、奇妙なことが見出された。パイオンビームのエネルギーを上げていくと、散乱断面積がだんだん増加する一方なのである。フェルミがとまどっているとき、若い理論家のブルックナーが、パイオン-核子の共鳴状態が存在するのではないかと示唆（しさ）した。同じことが、藤本陽一、宮沢弘成の両氏によっても指摘された。

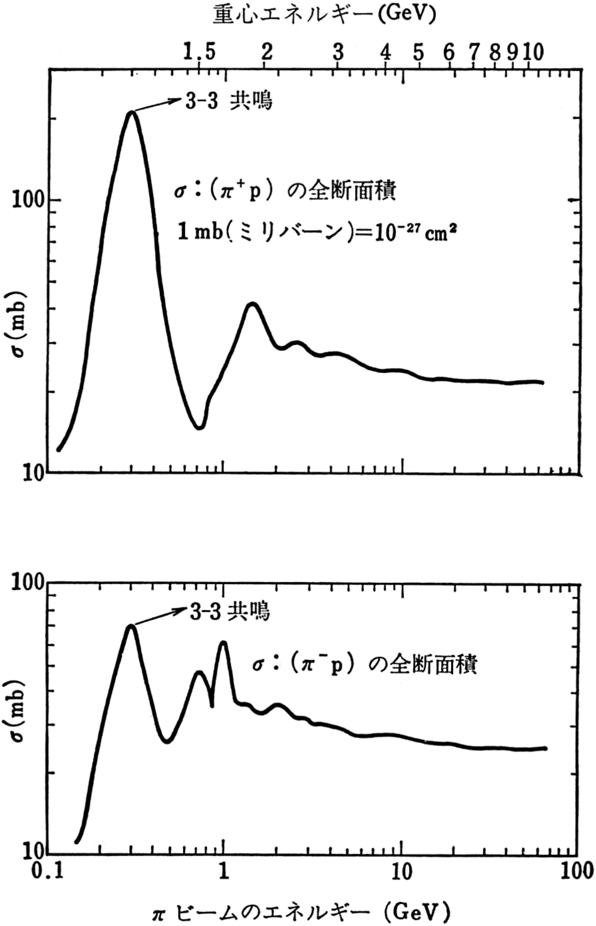
共鳴状態は非常に寿命の短い粒子だと考えてよい。普通の粒子のごとく一定の量子数（スピン、アイソスピン、ストレンジネスなど）をもっている。安定な粒子と異なるのは、質量がぼやけて幅が広くなることだ。厳密な意味では中性子やパイオンのような粒子もすべて共鳴状態だといっても少しも悪いことはないのだが、ここで考えている共鳴状態の寿命は、これらの場合よりははるかに短く、原子核のサイズ程度の距離を走るうちに崩壊してしまう、ほんのつかの間の存在である。したがって、質量の幅自身も数千万電子ボルトになり、質量自身と比べても特別小さくないことが多い。

フェルミのπN散乱の実験で散乱断面積がエネルギーとともに上昇していたのは、このような共鳴状態の起こるエネルギーの幅の中に入りかけていたからである。すなわち核子の励起された状態N^*があって、

$$\pi+N \to N^* \longrightarrow \pi+N$$

のような共鳴過程を起こす。共鳴散乱の典型的なふるまいは図7・7に示すとおりである。この山の頂上のエネルギーが共鳴状態の質量（の中心値）、山の幅が質量の幅を表す（幅が狭いほど、頂上の高さも高くなり、共鳴が目立ってくる）。散乱断面積に鋭い山が生ずれば、そこに共鳴状態があると考えて、まずまちがいがない。

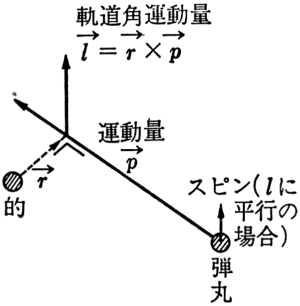
共鳴状態は、一定の量子数をもつので、これを決めるのも重要な問題であるが、そのためには



7.7　パイオン－核子（πN）共鳴散乱

前の九九ページの式のように、いろいろな反応の比を見るのがいちばん簡単である。フェルミの実験では、反応 a：b：c＝9：1：2であることによって、アイソスピンの3/2の共鳴状態の存在が確立されたのである。

ここでついでに共鳴状態のスピンについてふれておこう。スピンとは要するに角運動量のことで、今のN*の例で言えば入射するパイオンの軌道によって決まる軌道角運動量と、パイオンと中性子のそれぞれの固有スピン（パイオンは0、核子は½）との和である。いま入射するパイオンが運動量pをもって中性子の的に直進するが、ねらいが外れて、的の中心からrだけはなれた場所に向かったとすれば、そのパイオンの軌道角運動量は $l=r\times p$ であり、ベクトルとしては図7・8に示すように軌道面に垂直方向（z軸）を向いている。量子論に従ってlはプランク定数$\hbar$の整数倍に量子化される。核子のスピンがこの方向に平行（上向き）か反平行（下向き）かによって、全角運動量jは $(l+1/2)\hbar$ または $(l-1/2)\hbar$ となる。たとえば $j=\frac{2}{3}\hbar$ となるのは、$l=1$ で中性子のスピン平行か、$l=2$ で反平行の場合である。



7.8　軌道角運動量

一般に粒子間の相互作用は角運動量によって異なるので、特定のjで、特定のエネルギーのとき強い引力を示すことが

ある。このような場合に共鳴が起こりうるのである。古典力学的にわかりやすく説明すれば、N^*（$j=3/2$）の場合には $l=1$、スピン平行になったとき、強い引力がパイオンと核子の間に働いて、パイオンは核子のまわりを何回もくるくると回ったあげくに飛び去ると考えたらよい。回る回数が多いほど「寿命」が長く、したがって共鳴エネルギーの幅が狭くなる。

　ではN^*のスピンが $j=3/2$ だとは、どうしてわかるのだろうか。これを決める簡単な目安は二つある。その一つは散乱の角分布で、jによって特有のパターンを示すのである。大ざっぱに言えば、jが大きいほど角分布は複雑に振動する。もう一つは散乱断面積自身の大きさで、これは入射波のド・ブロイ波長の二乗とjとに比例すると考えたらよい。

　一般にハドロン同士の反応では、共鳴状態が非常にたくさん存在する。N^*をきっかけとして、その後続々とこのような例が発見されてきた。その数は事実上限りがないと言ってよい。ということは、ハドロンは実は複合粒子で、その内部の励起状態のいかんによって、いろいろな共鳴状態が生ずるからだと考えるのが自然であろう。すでに原子や原子核で同じような事情があることはよく知られているから、その意味ではハドロンもあまり変わりがないのである。

8　対称性と保存則



対称性とは

これまでいろいろな量子数のことを述べ、それらが素粒子の反応に選択則を与えることを説明した。保存則は実際に有用であるばかりでなく、自然現象の一般原理を反映するものとしても非常に重要に見られている。保存則にはエネルギーや電荷のように絶対的なものと、ストレンジネスやアイソスピンのように近似的なものとがあるが、特に前者は自然界の憲法のようなものである。

例えば「永久機関」は作れないという話を聞かれたことがあるだろう。エネルギーを無からどんどん作り出す永久機関の考えは、空を飛ぶ機械の考えと同じく、人間の夢としてはもっともな話だが、物理学者は、永久機関の方は絶対不可能だと頭からはねつけてしまう。なぜ彼らはそんなに確信をもって保存則を神聖なもののようにあがめるのだろうか。それを説明するのがこの章

の目的である。

一口に言えば、保存則は自然界におけるもろもろの対称性と密接に関係している。何か一つの対称性があれば、それに伴って一つの保存則が存在する、というのが一般の定理で、これはドイツの女流数学者のエミー・ネーターによって証明されたものである。ここでは数学には立ち入れないから、ごく直観的な解説にとどめておくが、まず運動量とエネルギーの保存則からはじめよう。

これらの保存則はそれぞれ空間と時間の等質性に由来するものとされる。等質性とは、どの一点をとっても他の点と同じ性質をもつということである。空間のある一点で、ある時刻における物理現象を司る法則は、他の点、他の時刻に移しても変わらない。波動の場合を例にとれば、一定の波長、一定の振動数で、空間的にも時間的にもどこまでも続く波が存在するのはこのためである。そして量子論では波長と運動量、振動数とエネルギーがアインシュタイン－ド・ブロイの関係で結ばれていることから、保存則と等質性の間に何か関係があるというのもおぼろげに理解できるであろう。

同様にして角運動量の保存則は空間の等方性に関係する。等方性とは、一点のまわりでどちらの方に向きを変えても事情が変わらないことである。等質性と等方性は時間、空間のもつ根本的な対称性だと見なされるから、それらから導かれる保存則が絶対的なものとして重要視されるの

は当然であろう。

右の説明ですでに気づかれたと思うが、対称性とは、いくつかの同等な立場が存在して、一方から他方に移っても自然法則が変わらないことである。こう考えれば、アイソスピンのような近似的な保存則にこれをあてはめるのも容易だ。つまり陽子と中性子、またはπ^+、π^0、π^-がほとんど同じ性質をもっていて、これらを入れかえてもちがいが目立たないからアイソスピンがほとんど保存されるのである。

それでは電荷の絶対保存はどんな対称性に基づくのだろうか。一口で言えば電荷は一種の角運動量のようなものと考えられる。ただし角運動量といっても実際の空間での回転に関するものではなく、量子力学的な波（波動関数）の位相の進みに関する抽象的なものである。電荷が0、±1、±2、……と量子化されているのは、普通の角運動量の場合と類似している。このように電荷を幾何学的な概念で解釈するのは後に述べるゲージ場理論の出発点である。

話を時空の対称性にもどそう。時空の対称性はさきほど述べた座標系の移動と回転につきるものではなく、反転というものも考えられる。反転には空間反転と時間反転の二種類があるが、特徴は少しずつの連続的変換ではなく、一挙に飛躍する変換で、しかも二回繰り返せば元へもどる。

空間の反転は鏡像変換とも呼ばれる。鏡の中に映して左右、または上下をひっくり返して見た

らどうなるかが問題なのである。人間はだいたい左右対称にできているから、鏡に映った自分の姿を自分そのものと思っても大きなまちがいは起こさないが、鏡の中では右利きが左利きに変わるのは誰でも知っている。いかに向きを変えても、右利きを左利きにすることはできないから、鏡の中の世界と、元の世界とは別物である。

右の事情を、前に述べた連続的な対称性と比べてごらんなさい。いまあなたが友人Xさんのカラースライドを二枚もっているとする。一つは東京駅八重洲口、一つは大阪の梅田で撮ったものだが、スクリーンに映して見て、どちらも同じXさんであることを疑わない。すなわちXさんは五〇〇キロメートルの座標移動に関して不変である。しかし、もしまちがってスライドを裏向きにしたらどうだろうか。Xさんがもし右のほおにほくろをもっていたとすれば、すぐまちがいがわかるはずだ。こんなXさんは実在しないと。

これに反して、素粒子のように「形」をもたぬ基本単位には左右の区別がないと考えるのが自然であろう。つまり鏡に映した世界も元の世界と同じく、「原理的」には可能で、同じ自然法則に従うと考えられる。その意味ではXさんの場合でも左のほおにほくろのある、陰のXさんが存在し得ない理由はない。

このような空間反転の対称性に伴う保存則はパリティの保存則と呼ばれるが、量子論においてはじめてその効能が現れる。それは反転によって、量子力学的な波動の山と谷がひっくり返るか

どうかが問題となるからである。例えば、ある点のまわりを回る波動が偶数個の山と谷（角運動量l＝偶数）をもてば、反転によって山を山に移すことができるが、奇数個（l＝奇数）ならば山は谷に変わる。前者の場合パリティはプラス、後者の場合マイナスと呼ばれる。ある反応においてはじめの状態とおわりの状態のパリティが同じであることが、パリティの保存則である。

角運動量に軌道角運動量と、固有のスピンとがあるように、パリティにも軌道によるものと、固有のパリティとがありうる。そしてパリティは、普通の量子数とちがってプラスかマイナスの二種類しかないので、複合系のパリティは、個々のパリティの和ではなく積と定義される。例えばパイオンの固有パリティはマイナスであるが、パイオンが二つくっつけば（相互の軌道角運動量が例えば0のとき）プラスになる。

パリティの非保存

パリティの保存、つまり左右の平等は空間の対称性の一部として当然のことと考えられていたが、一九五六年にこれが突然くつがえされ、物理学界に大きなショックを与えた。ことの起こりはKメソンの崩壊である。Kメソンは図7・1に示したごとくストレンジ粒子の一つで、K^+、K^0（ストレンジネス＋1）の一組と、その反粒子$\overline{K}^-$、$\overline{K}^0$（ストレンジネス−1）の一組があり、アイソスピンは½であるが弱い相互作用によっていろいろな粒子に崩壊する。例えばK^+の場合、

$$K^+ \longrightarrow \pi^+ + \pi^0 \quad (\theta^+,\ テータ)$$

$$\longrightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \quad (\tau^+,\ タウ)$$

$$\longrightarrow \bar{\mu}^+ + \nu_\mu \quad (K_{\mu 2})$$

などの過程がそれぞれ一定の確率で起こる。ただし、このタウは後に発見されたタウ・レプトンとは全く別物である。

しかし最初にKメソンがV粒子として観測されたときには、これらが同じ親の粒子の崩壊かどうかわからなかったので、現象に応じてカッコの中に示した名前がつけられていた（九四ページ図7・5）。親が同一の粒子であるためには質量が同一であるべきなのは当然だが、その他スピン、パリティなどすべての量子数も一致するはずである。

タウ粒子（τ）とテータ粒子（θ）の質量はやがて同一であることがわかった。スピンについても同様で、どちらも0。ところがパリティはタウ粒子がマイナス、テータ粒子がプラスだという結果が出てきた（パイオンのパリティがマイナスであることを使っている）。

ではタウ粒子とテータ粒子とはたまたま質量とスピンは同じだがパリティの異なる別の粒子だろうか。これがいわゆる「τ－θの謎」として理論家の頭をなやませたものであるが、それはやがてプリンストン高等研究所の若輩ヤンとリーによってみごとに解決された。彼らはベータ崩壊などの弱い相互作用においてパリティが保存されている証拠はまだ何もないことを指摘し、タウ

粒子とテータ粒子の場合、これらは同じ粒子だが、パリティが保存しないから二つのパイオンにも、三つのパイオンにも崩壊しうるのだと説明したのである。

そこで彼らの仮説を試すためにすぐ実験が行われた。コロンビア大学のレーダーマンのグループは π－μ－e（パイオン－ミューオン－電子）の崩壊過程の分析を、同じ大学のウー夫人のグループはコバルト（のアイソトープ）のベータ崩壊の分析をして、その結果どちらの場合においてもパリティが保存しないことが立証された。

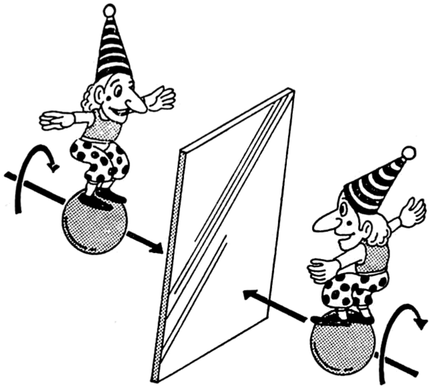
これらの実験で明らかになった著しい点は、ニュートリノのスピンに関するもので、ベータ崩壊の際電子eとともに放出されるニュートリノνは左巻き、陽子とともに放出される反ニュートリノ$\bar{\nu}$は右巻きの状態しかない。ここで左巻き、右巻きとは

ヤン（楊振寧）（一九二二～）



ヤン

楊振寧は中国安徽省の生まれ。戦後シカゴ大学に入学した。その頃はエンリコ・フェルミや「水爆の父」エドワード・テラーなどがまだシカゴで活躍中で、形式的にはテラーの弟子となった。フェルミ－ヤンの理論はそのころの産物であるが、強磁性体のアイジングモデルに関する論文も有名である。次いでプリンストンの高等研究所のメンバーとなり、所長オッペンハイマーの庇護を受けた。一九五四年、ミルズとともにヤン－ミルズ理論を発表し、非アーベル・ゲージ場理論を創始したが、その真の物理的意義が認識されるま



鏡に映すと左巻きが右巻きに

でには十数年かかった。一九五六年、いわゆる「タウ・テータ（τ・θ）の謎」（一一〇ページ）にヒントを得て、リーと共同でパリティ非保存の一般論を発表した。数ヵ月後にウー（呉）夫人の実験やレーダーマンの実験が出て、これがみごとに確認され、翌年リーとともにノーベル賞を受賞した。自然が対称性を守らないことをはっきり示した点で、物理学者に与えたショックは大きかった。ヤンは現在ニューヨーク州立大学名誉教授。

リー（李政道）（一九二六〜）

李政道は上海の生まれ。ヤンのやや後輩にあたり、シカゴ大学から、プリンストンへと同じ途をたどった。シカゴでの指導教授は有名な天体物理学者のチャンドラセカール（故人）。チャンドラはウィスコンシン

光の円偏光のように、その伝播方向に向かったスピンが左巻き（$-\frac{1}{2}$）か右巻き（$+\frac{1}{2}$）かということである。

鏡に映して見ると左巻きが右巻きに変わることは右の絵からわかるだろう。だから自然はパリティを必ずしも守らないのである。実際の実験ではニュートリノのスピンが直接観測されるわけではないが、結果としてベータ崩壊の際電子の放出される方向に非対称性が生ずる。レーダーマンの実験では、サイクロトロンで作られたπ^-メソンがμ^-（ミューオン）と$\bar{\nu}$（反ニュートリノ）にこわれ、さらにμ^-がe^-（電子）を放出したとすると、e^-がμ^-の運動方向に出る割合の方が、反対方向に出る割合より多い。

CPの破れ

ニュートリノの場合に左右の対称性がないことがわかったが、少し譲歩すれば対称性がまだあ

州のヤーキーズ天文台から毎週シカゴに出て、リーとヤンのために講義をしていたことがある。「私の一クラス全部がノーベル賞をもらった」とチャンドラは述懐した。ヤンと同じく、リーには統計力学や場の理論でも業績が多い。現在はコロンビア大学教授。


リー

るとも言える。なぜならば、ニュートリノνは左巻き、反ニュートリノ$\bar{\nu}$は右巻きだから鏡像と同時に粒子を反粒子に変えたらよい。粒子‐反粒子の入れかえはあらゆる粒子について同時にせねば意味がないから、電子や陽子の電荷が逆になる。その意味でこれは電荷反転と呼ばれるものであるが、電荷（チャージ）とパリティの頭文字をとって右の同時操作は普通ＣＰと略称されている。

自然界の法則は、弱い相互作用を除いてはＣおよびＰの操作に対して対称であり、弱い相互作用の場合でもＣＰの同時操作については対称である、という考えがパリティ実験以後数年は通用した。実際孤立した世界の粒子を全部反粒子に入れかえても、電荷の符号は相対的なものだから何も電磁的なちがいは生じないし、弱い相互作用に関しても、鏡に映して見れば右巻きの反ニュートリノ$\bar{\nu}$は左巻きに変わって、はじめのニュートリノνの世界と一致してしまう。さきほどの$K^{\pm}$の例においては、K^{+}と鏡の中のK^{-}とは同じふるまいをするであろう。

けれどもＣＰの対称性も破れている現象があることが一九六四年に発見され、物理学者はまたまた愕然とさせられた。発見者はプリンストン大学のフィッチとクローニン、現象は再びＫメソンの崩壊に関するものだが、パリティの破れよりもいっそう微妙な、説明のむずかしいものである（この仕事によってフィッチとクローニンはノーベル賞を受賞した）。

ＣＰの破れに非常に敏感な都合のよいテストがある。それは中性のＫメソン、すなわちK^{0}と

$\overline{K}^0$である。これらはお互いに反粒子だが、V粒子として観測されるのは、前の$K^{\pm}$の場合のように二つのパイオン（$\pi^+\pi^-$または$\pi^0\pi^0$）および三つのパイオン（$\pi^+\pi^-\pi^0$または$\pi^0\pi^0\pi^0$）への崩壊である。これらの状態は電荷について対称、すなわち C＝プラス の量子数をもっているが、パリティについては前者はプラス、後者はマイナスである。崩壊過程でもしCPが保存されるならば、前者は CP＝プラス の粒子の崩壊、後者はマイナスの粒子の崩壊であり、両者は異なった親粒子でなければならぬ。

CP＝プラス の粒子はK_1、マイナスのものはK_2と呼ばれている。これらはK^0、$\overline{K}^0$の波の次のような混合だと考えられる。

$$K_1 = K^0 - \overline{K}^0 \qquad (C = -1,\ P = -1,\ CP = +1)$$

$$K_2 = K^0 + \overline{K}^0 \qquad (C = +1,\ P = -1,\ CP = -1)$$

逆にK^0、$\overline{K}^0$はK_1、K_2の重ね合せだとも見られる。

この事情は偏光の場合と全く同じである。一方向に偏った直線偏光は右回りと左回りの二つの円偏光の和とも見られるし、逆に円偏光を二つの直線偏光から合成することもできる。どちらがより基本的だとは言えない。しかし偏光媒質の中を光が通るとき、媒質の種類によって直線偏光の二成分の中の一つをさえぎったり、あるいは円偏光の二成分の一つをさえぎったりする。だから媒質に応じてどちらかの偏光でものを考える方が便利である。

Kメソンの場合も同様で、Kメソンが強い相互作用によって作られるときは、ストレンジネスで分類してK^0または$\overline{K^0}$ができると考える方がよく、弱い相互作用によって崩壊するときはCPで分類してK_1またはK_2がこわれると考えた方がよい。K_1とK_2は崩壊に関しては異なる粒子だから寿命もちがってよい。実際K_1の寿命はK_2の一〇〇分の一にすぎないのである。最初にK^0（または$\overline{K^0}$）のビームが発生したとすると、これはK_1とK_2の混じったものだが、K_1の部分は早く崩壊して、何メートルか走るとK_2だけが残る。

フィッチとクローニンは、この残ったK_2も二つのパイオンにこわれうることを発見した。つまりK_2は2πへも、3πへも崩壊できるのであるから、CPが保存しないことになる。

自然法則は時間反転に対して不変か

CPの話でよく聞くことだが、CPTの定理というものがある。ここでTとは時間反転の操作、つまり映画のフィルムを逆転させることである。物理の基本法則が時間反転に対して不変であることは昔から知られている。それにもかかわらず実際の世界では時間の向きが決まっていて、熱は必ず温度の高い方から低い方へ流れ、人間はだんだん歳をとる。その理由が何かは、ここ一〇〇年間物理学者の頭をなやませてきた問題であり、これを議論し出したらきりがない。

しかし今問題にしているのは自然法則が本当に時間反転（T）に対して不変かどうかである。

ＣＰＴの定理によれば、一般に自然法則はＣ、Ｐ、Ｔの三種の反転操作を続けて行えば不変でなければならない。もしＣＰの操作だけでは不変でないならば、Ｔの操作がそれを打ち消すはずであるから、Ｔだけの操作も不変性を破ることになる。

だから結局のところ、ＣもＰもＴも厳密には自然界の対称性ではない。しかし対称性が破れているのは弱い相互作用に関してだけであって、そのためたいていの現象には影響を及ぼさない。自然はちょっとキズのある出来損いだが、それが巧みにかくされていて目立たないようになっているとも言えよう。

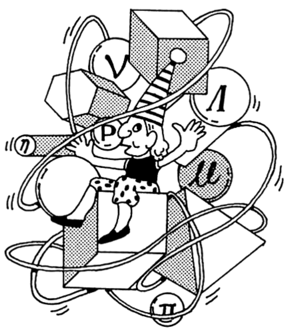
もう一度ここではっきり断っておくが、日常の世界に見られる非対称性と、今議論している自然法則の非対称性とは別物である。人間には右利きが多い。また太陽系は核子と電子とでできていて、反核子、反電子から成り立っているものではない。けれども、われわれの世界にＰやＣを操作した世界が原理的に作れないわけではない。このような裏返しの世界が一度できてしまえば、それはわれわれの世界と同じようにふるまい、ちがいを見出すのは容易ではない。例えば裏返しの世界では左利きの人間が多く、道路は右側通行、地球は西と東が逆になって、太陽は東（もとの西！）から出るだろうが、その世界の住人にちがいがわかるだろうか。

たとえ自然法則自身は左右対称でも、世界を実現するには、最初にある状態から出発せねばならない。これを初期条件といい、そのとり方は任意である。偶然に支配されるとも言える。しか

し無数の素粒子からなる実際の世界は非常に複雑なので、最初に偶然左巻きの分子ができると、それに続く化学反応がみな影響されて、左巻きの分子しか事実上できなくなるかもしれない。すなわち初期条件によって事実上の非対称性が生じうるのである。

付和雷同性は人間だけの特性ではなく、物理現象にもあてはまる。そのために対称性が自然に（または自発的に）破れて見える例は多々あるが詳細は17章まで待っていただきたい。

9　ハドロンの複合モデル



基本粒子への期待

中野－西島－ゲルマン（NNG）の法則によって、ハドロンの反応には、はっきりした規則性があり、それは各ハドロンがアイソスピンとストレンジネスの量子数を担うことによることがわかった。一方、ハドロンにはたくさんの共鳴状態（励起状態）があり、原子や原子核のような複合粒子の特徴をもつこともわかってきた。この二つの事実を関連させて考えれば、ハドロンは何らかの基本粒子の組合せでできていて、基本粒子自身がこれらの量子数を担っていると見るのは自然なことであろう。

しかし未知の粒子を導入することは、後からふりかえって当たり前のようでも、そう生やさしい仕事ではない。陽子と中性子が原子核を作り、パイオンが核力を媒介するというイメージができ上がってしまって、それで特に矛盾することがないときに、それをぶちこわすイメージを作る

には相当の勇気が必要である。少なくとも研究者は、絶対に必要でない限り、新しい仮説は極力さけようとする。実証を何よりも重視する自然科学の伝統としては非常にもっともなことである。

けれども一面、現象の表面的記述だけが自然科学ではないことも、歴史がいやというほど教えてくれる。幸いにして日本の物理学には湯川理論のように建設的な考え方を重んずる伝統が存在している。湯川博士の協力者であった坂田昌一、武谷三男などの物理学者が、特にこの点を意識的に強調し、素粒子物理の研究はいかにあるべきかを方法論として強く主張したのは、後進の研究者にも大きな影響を与え、その結果としていろいろ注目すべき成功を生んでいる。これらについては後にまた述べる機会があるが、ここでは坂田博士が唱えた坂田モデルなるものからはじめよう。

フェルミとヤンの複合モデル

すでにパイオンの存在が確立されて間もなくのころ、フェルミとヤンがおもしろい説を出した。ヤンはそのころまだシカゴ大学の学生で、リーといっしょにパリティの非保存を予言してノーベル賞をもらったのはのちの話である。フェルミ－ヤンの説というのは、パイオンを核子と反核子の複合粒子と考えても量子数がうまく合うことを指摘したものである。すなわち陽子p、中

性子n、反陽子$\bar{p}$、反中性子$\bar{n}$を組み合わせて

$$\pi^+ = p\bar{n},\quad \pi^- = n\bar{p},\quad \pi^0 = (p\bar{p} - n\bar{n})$$

がパイオンの化学式だとすれば、荷電のみならず、アイソスピンも正しく対応づけられる。なぜならばp、n、$\bar{p}$、$\bar{n}$はそれぞれI_zが½、−½、−½、½であり、π^+、π^-、π^0は$I_z = 1, -1, 0$だからである。ただしπ^0の式は、K_1、K_2の式（一一五ページ）と同じく波の重ね合せを意味するものである。この場合、引き算になっているのは$\pi^{\pm}$といっしょになって長さ1のアイソスピンの三個組を作るのに必要なのだが、その数学的理由には立ち入らないことにする。

　これでパイオンのアイソスピンは片づいたが、スピンの方はどうだろうか。パイオンのスピンは0で、パリティはマイナスであることがわかっている。核子はスピン½をもつから、逆向きのスピンを

フェルミ Enrico Fermi

（一九〇一〜一九五四）



　理論にも実験にも画期的な貢献をしたイタリアの万能物理学者。ローマで生まれ、ピサで学位をとり、二六歳でローマ大学教授となった。中性子を使った実験的研究で一九三八年ノーベル賞を受賞したが、理論の方でもフェルミ‐ディラック統計（一九二六年）、ベータ崩壊の理論（一九三四年）などは特に有名である。イタリアのファシスト政権を逃れてアメリカのコロンビア大学に移った直後、ドイツで核分裂発見のニュースを聞き、すぐ追実験をはじめた。これが原子力研究のはじまりである。一九

二つ組み合わせればたしかに0のスピンを作れる（その説明は長くなるので省略する）。そしてパリティは？　これもうまくいく。粒子と反粒子は互いに反対の固有パリティをもっていて、その積がマイナスになるからである。

	p	n	$\bar{p}$	$\bar{n}$	$\pi^+ = p\bar{n}$	$\pi^- = n\bar{p}$	$\pi^0 = p\bar{p}-n\bar{n}$
I_z	$1/2$	$-1/2$	$-1/2$	$1/2$	1	−1	0
スピン	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	0	0	0
パリティ	＋	＋	−	−	−	−	−

9.1　パイオンを核子と反核子の複合粒子と考えても（フェルミ－ヤンモデル）量子数のつじつまは合う

四二年一二月二日フェルミの指導で作られたシカゴ大学の原子炉が臨界出力に達し、持続連鎖反応の可能性が実証された。戦後はフェルミは純粋物理にもどり、シカゴにサイクロトロンを建設してパイオンの実験的研究をはじめたが、惜しいことに癌のため五三歳で亡くなった。

フェルミは天性のリーダーで、彼の残した伝統や伝説は今でもシカゴに強く生きている。教室では素晴らしく明快な講義をする反面、ドクターコースに入るときの試験のむずかしさは有名であった。私は初めて彼の学会講演を聞いたときの印象を友人に書き送った。「フェルミは歌舞伎の舞台に立った役者のようだった」。

素粒子の世界での「素」と「複」

実際にパイオンは核子と反核子の複合状態であろうか。原子や原子核が複合系である第一の証拠は、それらをばらばらに分解して構成要素をとり出せるからである。それではパイオンを分解できるか、すなわち外からエネルギーXを与えて

$$X+\pi^{-}\longrightarrow \bar{p}+n$$

のような反応を起こせるだろうか。パイオンの試料を用意することは、原子や原子核の試料を用意するような意味ではできないから、そうやさしいことではないが、右の逆反応は考えられる。その際、エネルギーXはいろいろな粒子（γ、π^{0}、……）の形で放出されるであろう。しかしこのような反応は今まで取り扱ってきたいろいろな例と比べて何も変わったことはない。同じ議論をすれば、光子は電子、陽電子の対に変換しうるから、後者の複合状態だとも言えるであろう。つまり粒子の間の変換が自由に起こっている「素」粒子の世界では、どれが「素」でどれが「複」かを厳密に定義しようとすると、わけがわからなくなってしまう。ただ水素原子などの場合で言えることは、束縛エネルギーが構成粒子（陽子と電子）の質量に比べて小さい、すなわちゆるく結合している状態だから構成粒子の性質があまり変わっていない。これに反して、パイオンの中の核子を顕微鏡でのぞいて見たら、単独の核子とは似ても似つかぬ形をしているかもしれない。

いずれにせよ素粒子、複合粒子の区別はある程度便宜的なものにすぎないことは認めざるを得

ない。しかし基本粒子の数をなるべく少なくして、それから他のあらゆる粒子の性質を導き出すことができれば、概念の節約という大きな利益が生ずるであろう。単純なものから複雑なものを説明するのが、もともと素粒子論の目的であった。ただ実際問題としてつきつめて考えると素粒子と複合粒子の差がぼやけてきて、白と黒のようにはっきりしたものではないことをここで断っておきたかったのである。

フェルミとヤンがパイオンの複合モデルをどこまで真剣に考えたかはわからない。もともとフェルミは当時の量子論、すなわち湯川理論などの基礎である場の量子論というのをあまり信用していなかったので、横紙破りをやってみたのかもしれない。なぜ信用しなかったかといえば、一つにはこの理論が不完全で、簡単な現象を除いて、一般にナンセンスな答を出すことが知られていたからであろう。この困難、無限大の自己エネルギーと言われている困難は、やっとその頃、朝永、シュウィンガー、ファインマンなどによって一応克服されたばかりであって、それが完全な解決であるかどうかも明らかでなかった。

素粒子を記述する数学的なお膳立てと、どんな素粒子が存在するかという実在の問題とは一応区別しておかねばならない。前者が不完全だからといって後者を探究するのをためらう必要はないのである。坂田博士はフェルミ、ヤンのモデルを一歩進めて、ストレンジ粒子も同じような処方で解釈しようという試みを出された。

坂田モデル

坂田モデルと言われる理論によれば、フェルミ、ヤンの陽子（p）と中性子（n）にラムダ粒子（Λ）が加わって、p、n、Λの三つのバリオンが基本粒子となる。ほかのハドロンはメソンもバリオンもみなこの坂田の三個組から合成される複合粒子である。例えば、

$$\pi^+ = p\bar{n},\quad \pi^- = n\bar{p}\ \text{（フェルミ、ヤン）}$$
$$K^+ = p\bar{\Lambda},\quad K^0 = n\bar{\Lambda}$$
$$K^- = \Lambda\bar{p},\quad \bar{K}^0 = \Lambda\bar{n}$$

のように、メソンについてはフェルミ、ヤンの拡張になっている。しかしバリオンについてはちょっと面倒である。バリオンはフェルミ統計に従い、半整数のスピンをもつから、複合粒子としてはpnΛを三（または五、七、……）個含まねばならない。例

坂田昌一（一九一一〜一九七〇）



東京生まれ。京大で湯川博士の学生、協力者として武谷三男、小林稔などといっしょに初期メソン論の発展に貢献したが、理研の仁科、朝永グループに加わったあと名古屋大学に移り、独自の立場を展開された。谷川、坂田の二メソン論は一九四二年に、いわゆる坂田モデルは一九五六年に出た。それ以外に唯物弁証法的立場に基づく方法論的主張と批判を執拗に続けられ、著書、講演などを通して若い研究者に与えた影響は非常に大きい。例えば博士は素粒子の層は無限にあると主張されたが、これは新粒子を導入することに対する研究者の心

えばシグマ粒子（Σ）はΛとπの組合せ、グザイ粒子（Ξ）はΛとKの組合せのようなものだから、

$$\Sigma^+ = \Lambda\pi^+ = \Lambda p\bar{n}$$

$$\Xi^0 = \Lambda\bar{K}^0 = \Lambda\Lambda\bar{n}$$

などのように考える。

坂田モデルの大きな利点はNNGの法則の起源がみごとに理解できることである。すなわち陽子pと中性子nがアイソスピン$\pm\frac{1}{2}$を担い、ラムダ粒子がストレンジネスを担う。これらの量子数は結局三つの基本粒子を区別するレッテルにほかならない。そして対称性と保存則との関係を説明したときに、アイソスピンの（近似的な）保存を、陽子と中性子との相似性に帰着させたが、同じ議論を陽子、中性子、ラムダ粒子の三個組に適用しようと思いつくのは自然なことであろう。

このアイデアを実行したのは池田峰夫、小川修三、大貫義郎（以下IOOと略す）の三氏と山口嘉夫である。数学の術語を使えば、三個組のもつ状態を混ぜ合せる変換が$SU(3)$対称性と呼ばれる。SUとは特殊ユニタリー群（special unitary group）の略で、三つの状態を混ぜ合せる変換が$SU(3)$という群を作ることを意味している。同様にして、二つの状態（例えばpとn）を混ぜ合せる変換は$SU(2)$で、これのもたらす対称性はすなわちアイソスピン対称性にほ

理的抵抗を減らすのに貢献した。牧の四クォーク理論（二二八ページ）などの予言者的卓見が出たのも不思議ではない。現在の素粒子論の発展は坂田博士の筋書きどおりになっていると称しても過言ではなかろう。

かならない。

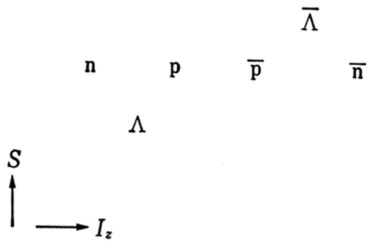
二つの異なる状態を区別するにはそれぞれに異なるレッテル、つまり量子数を与えてやればよい。アイソスピンの成分 I_z が $\pm\frac{1}{2}$（上向きまたは下向き）というふうに。次に第三の状態をはじめの二つから区別するには、もう一つ新しい量子数が必要である。ストレンジネス S がまさにこの役を果たしている。陽子、中性子は $I_z=\pm1/2$, $S=0$, ラムダ粒子は $I_z=0$, $S=-1$ であるから I_z と S とを指定してやれば三個組の中のどれを指すかが確定する（図9・2）。

これを一般化してやれば、n 個の組には $n-1$ 個の量子数が伴うことになる。

しかし、量子数の選び方には大きな任意性がある。例えば（p、n、Λ）の場合には、本当に三つの状態の物理的性質が同じならば、中性子とラムダ粒子を I_z で区別し、陽子を S で中性子、ラムダ粒子から区別しても一向にさしつかえないであろう。しかし実際問題としては陽子、中性子、ラムダ粒子の三人兄弟の中で陽子と中性子が特によく似ているからNNG式の量子数に意義があるわけで、単に歴史的慣習によるわけではないのである。

前の章で、アイソスピン(SU(2))の対称性は、単に I_z の保存のみならず、異なった反応の間の関係をも与えることを述べた。同じことが SU(3)についても言える。つまり陽子、中性子、ラムダ粒子の多少のちがいを無視すれば、これらの組合せで作れるいろいろな反応の間に近似的関係が存在することになる。これが、IOOの SU(3)対称性の理論のもたらす有力な結果の一

	p	n	Λ	$\bar{p}$	$\bar{n}$	$\bar{\Lambda}$
I_z	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
S	0	0	−1	0	0	1



9.2　3個の組には2つの量子数

つである。

それのみならず、$SU(3)$の対称性の議論から一般に三つの基本粒子（および反粒子）をいくつか組み合わせたときにどんな多重組ができるかがわかる。例えば三種類の基本粒子（p、n、Λ）から二粒子の複合状態を作れば、その種類は $3 \times 3 = 9$ だけある（pp、pn、np、……など）。しかし二粒子の入れかえに関する対称性を考慮すれば、二つの多重組、すなわち対称的な組（六種）と反対称的な組（三種）とに分かれ、それら二組は物理的性質、例えば質量などがちがっていてもかまわない（図9・3）。

同様にして粒子と反粒子の組合せからできる状態はやはり九種だが、この場合は対称性の議論から八個組と一個組に分かれることが示されるのである（図9・4）。pnΛおよび$\bar{p}\bar{n}\bar{\Lambda}$の

三個組をそれぞれ3、$\bar{3}$と表せば、

$$3\times3=6+\bar{3}$$

$$3\times\bar{3}=8+1$$

と算術のような式になるが、ここで右辺の$\bar{3}$は量子数の点で反粒子の$\bar{p}\bar{n}\bar{\Lambda}$と同等だという意味である。

ＩＯＯの対称性の偉力をためすにはメソン族をまず見ればよい。これらは$3\times\bar{3}$に属するものだとすれば、図9・4の八個組はたしかに九二ページの図7・1の八個組（π、K、η）に対応する。一個組はどうかといえば、これはη'と呼ばれるメソンに相当するらしく、その質量は他の八つよりかなりかけはなれて重いから、右の式の分類法にかなっている。のみならず、八個組の中での質量差、例えば$K^+=p\bar{\Lambda}$が$\pi^+=p\bar{n}$より重いのは、ラムダ粒子Λが中性子nより重いからだと簡単に解釈できる。

残念ながら、バリオンの方に来ると、この坂田

対称なもの(6)

nn　　pn＋np　　pp

nΛ＋Λn　　pΛ＋Λp

ΛΛ

反対称なもの($\bar{3}$)

pn－np

nΛ－Λn　　pΛ－Λp

9.3　3×3の複合状態

8つ組	$n\bar{\Lambda}$		$p\bar{\Lambda}$
	$n\bar{p}$	$p\bar{p}-n\bar{n}$ $p\bar{p}+n\bar{n}-2\Lambda\bar{\Lambda}$	$p\bar{n}$
	$\Lambda\bar{p}$		$\Lambda\bar{n}$
1つ組		$p\bar{p}+n\bar{n}+\Lambda\bar{\Lambda}$	

9.4　3×$\bar{3}$の複合状態

モデルはつまずいてしまう。すでに学んだように、バリオンにも、メソンの場合と同じような八個組があって（図7・2）、坂田モデルではその中のp、n、Λを特に切り離して三個組の基本粒子と考えたわけであった。しかし残りの五つ（Σ、Ξ）の性質がp、n、Λとかけはなれているわけではないから、これは不自然であるし、だいたい五個組なるものは$SU(3)$の対称性には存在しない。

一つの逃げ道は、陽子、中性子、ラムダ粒子と同じアイソスピンとストレンジネスの量子数をもつ励起（共鳴）状態が知られているので、これらをシグマ粒子Σ、グザイ粒子Ξといっしょにまとめて八個組と解釈することである。

しかしこのような試みは成功せず、結局ゲルマンとツワイクが提唱したクォークモデルが坂田モデルにとって代わることになるのである。クォークモデルについてはすでに2、3章で内容を紹介したが、それがハドロンの性質をいかにうまく説明できるかについて、さらに次の章でもう少しくわしく論じることにする。

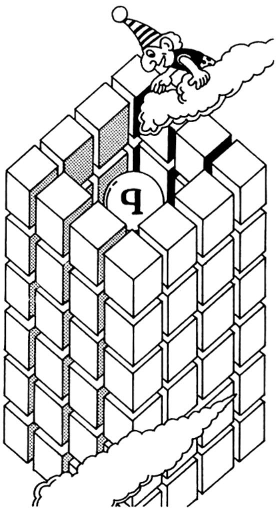
10 クォークモデル

坂田モデルとのちがい

クォークモデルと坂田モデルのちがいは、クォークモデルの場合、基本粒子を既知のハドロンより一段下った新しい層に求めたことである。すなわちハドロンはすべてが複合粒子であって、その意味では平等である。バリオンの中から陽子、中性子、ラムダ粒子をとり出して別格に扱った坂田モデルの困難はこれで解消されてしまうが、その代わり、バリオンは三つのクォークを含む複合体という、一見不自然な構造を仮定しなければならない。

しかしクォーク自体の性質は、坂田モデルにおける陽子、中性子、ラムダ粒子とあまりちがわない。もともとアイソスピンとストレンジネスの担い手となるべきものだから、これは当然である——ただしセンセーショナルな一点、つまり電荷が分数であることを除いては。

クォークについてはすでに2、3章で一応の説明をしておいたが、ここでもっと立ち入った紹



介をすることにしよう。クォークモデルはゲルマンとツワイクとにより、一九六四年に独立に提唱された。ゲルマンは新しい基本粒子の三個組をクォーク（quark）と呼び、ツワイクはエース（ace）と名づけた。エースはトランプカードのエースと連想したらよいだろう。

クォークの方はジェームズ・ジョイスの小説『フィネガンズ・ウェイク（Finnegans Wake）』の中の一句から取ったと、ゲルマンは断っている。いずれにしても、これらの名前は命名者のウィットを示すもので、意味をせんさくする必要はない。クォークという名が一般に通用しているのは、言葉の神秘的な響きと、命名者の権威によるものであろう。

ゲルマン、ツワイクの三種のクォークは、現在u、d、sの記号で表す習慣になっている。これらは坂田モデルのp（陽子）、n（中性子）、Λ（ラムダ粒子）に対応するものである。すなわち、

$$(u,\quad d,\quad s) \longleftrightarrow (p,\ n,\ \Lambda)$$

$$\text{電荷}\quad 2/3,\ -1/3,\ -1/3 \longleftrightarrow 1,\ 0,\ 0$$

u、dはアイソスピンの上向きと下向き（up, down）、sはストレンジの意味である。坂田の三個組と比べて、クォークの電荷が⅓だけ一様にずれていることに注意されたい。その結果三つのクォークの電荷の和（または平均）が0になるが、異なるクォーク間の電荷の差はpnΛの場合と変わらない。いや、むしろ右の二つの性質を要求してクォークモデルが作られたのであ

る。

　坂田モデルでは、メソンは粒子、反粒子の結合であったが、クォークモデルでも、その点に変わりはない。p、n、Λをu、d、sでおきかえただけである。クォークの電荷が⅓ずれても、反クォークが−⅓だけずれるから、両方の和には効いてこないのである。

　これから簡単のためにクォーク、反クォークを一般にq、$\bar{q}$と書き、u、d、sのクォークをq_1、q_2、q_3で区別することにすれば、メソンMは

$$M = q_i \bar{q}_j$$

という化学式で表されることになる。個々のメソンとの対応は九二ページ図7・1と一三〇ページ図9・4を見て考えていただきたい。前章での議論によれば、3×3＝9の組合せは、八個組と一個組に分けられる。

ゲルマン　Murray Gell-Mann
（一九二九〜）



ニューヨークの生まれ。マサチューセッツ工科大学（MIT）で学位をとった。戦後の素粒子論の形成にあずかった中心人物と言ってよかろう。シカゴ大学に講師として就任したが、一年ごとに昇進し、三年後にはファインマンのいるカリフォルニア工科大学に教授として引き抜かれた。中野－西島－ゲルマンの法則（一九五三年）はこの時期の産物である。その他無数にある業績の中で著しいものをあげれば、ゲルマン－ローのくりこみ群方程式、ファインマン－ゲルマンのVマイナスA相互作用の理論、ネーマンと独立に出

クォークモデルにおけるバリオン

ではバリオンの方は？　坂田モデルとのちがいはここではっきり現れる。ＮＮＧの法則がSU(3)の対称性から導かれることは、ＩＯＯの理論のあとで、ゲルマンとネーマンとによっても、それぞれ独立に指摘されたが、坂田モデルのような実体から出発したのではなく、数学的対称性だけに基づいたものである。そして既知のメソンもバリオンもSU(3)の八個組に属するものと解釈されている。ゲルマンが自分の理論を「八道説」と呼んだのはそのためである（八道とは仏教で悟りを開くための八つの道にちなんだものである）。SU(3)の対称性だけからは、八個組だけが存在するという理由はなく、むしろ三個組が一番基本的なものである。他の組はすべて、基本的な三個組から合成することができる。この三個組がすなわちクォークである。

ここでバリオンの八個組をどうして合成するかを説明しよう。そのために前の章の粒子合成の

した八道説、ツワイクと独立に唱えたクォーク仮説、カレント代数の理論などがある。この中で、くりこみ群の概念は二〇年後にゲージ場や統計力学に応用されるようになって、やっとその価値が認識された。一九六九年ノーベル賞受賞。言語学にも造詣が深いが、物理の術語では、ストレンジネス、クォーク、カラー（色）などが彼の命名であり、素粒子論を名実ともにアメリカナイズした張本人とも言える。

話をもう一度繰り返さねばならない。まず三種のクォークを二個とって、3×3＝9の組合せができるが、これが六個組と三個組に分かれる（一二八ページ）。このうち、三個組は二つの異なるqの反対称の組合せに相当し、その量子数（I_zと電荷Qなど）がちょうど反クォーク$\bar{q}_1$、$\bar{q}_2$、$\bar{q}_3$と同じになっている。すなわちこれらは$SU(3)$の対称性に関する限り、反クォーク$\bar{q}$と同等である。したがってメソンの八個組をqと$\bar{q}$から合成したように、qとqqとを使っても八個組が作れる。これがバリオンにほかならない。

$$B = q_i(q_j q_k) = q_i q_j q_k$$

組合せの詳細は図10・2を見られたい。もちろん三種のqを三つ組み合わせる方法は全部で 3×3×3＝27 もあるので、八個組以外のものも作れる。例えば一〇個組なるものも存在し、ダイヤグラムで示せば図10・3のごとくである。

この一〇個組がバリオンの共鳴状態として存在するということが、$SU(3)$対称性を証明する決め手となった。その中で、一番てっぺんのΔ（デルタ粒子）は、$S=0$，I

	p	n	Λ	u	d	s
I_z	$1/2$	$-1/2$	0	$1/2$	$-1/2$	0
ストレンジネス	0	0	-1	0	0	-1
電荷	1	0	0	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$
スピン	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$

10.1 坂田モデルの基本粒子とクォークの比較

＝3/2、スピン$3/2$のハドロン、つまり7章で説明したπN（パイオン－中性子）の3－3共鳴状態のことである。その次の二つのレベル、S＝－1，I＝1とS＝－2，I＝1/2は、八道説が出たころすでに候補者が出ていたが、最後のS＝－3，I＝0の一個はまだ知られていなかった。既知の三つのレベルを比べると、質量が一四〇～一五〇MeVほど等間隔に上がっている（すなわち質量に関する限り三角形をひっくり返すべきである）。いずれにせよ、この規則性を最後の一個にも適用すれば、その質量はだいたい一六八〇MeVであるべしと予言される。

予言どおりのΩ^-粒子の発見

この未知の粒子Ω^-（オメガ・マイナス）の発生と崩壊が一例、ブルックヘーブン国立研究所の泡箱の中でサミオスたちによってとらえられたのは一九六三年である。

質量は予言のとおりであった。たった一個の例で結論を下すのは非常に危険で、研究者が一般にやるべきことではないが、Ω^-の存在は単にSU(3)の妥当性を証明しただけではない。というのは、バリオンの八個組とメソンの八個組を反応させれば、27の組というものも原理的には作れる。πNの3－3共鳴などをその一部と考えることも可能だが、この場合にはS＝－3の状態はI＝1、すなわち三種なければならぬ。つまりSU(3)だけからは、まだいろいろな可能性があって、どれが実現されるかの細かい点は実験によって決めねばならないのである。

$SU(3)$の対称性理論が教えることを要約すれば次のようになる。

(1) ハドロンが一般に、一個組、八個組、一〇個組などのグループを作り、一つのグループの中では、スピンは等しく、質量は比較的に近く、NNGの法則に従う一定のストレンジネスとアイソスピンのパターンを示す。

(2) 一つの組の中で質量は同じでないから、対称性は完全ではないが、対称性の破れ方にもある程度の秩序があって、ゲルマン‐大久保の質量公式という関係をみたす。さきに述べた一〇個組の等間隔則はその一例であるが、このゲルマン‐大久保の公式というのは、要するにストレンジネスとアイソスピンの値によって質量が変わることを表したものである。

(3) その他、一個組に関するいろいろな反応や、粒子の磁気能率の間にも一定の近似的関係が成立する。

d(du) **u(ud)**

d(ds) **u(ds)+d(us)** **u(us)**

u(us)+d(ds)−2s(ud)

s(ds) **s(us)**

10.2 バリオンの 8 個組の合成
$n^0=d(du)$, $P^+=u(ud)$
$\Sigma^-=d(ds)$, $\Sigma^0=u(ds)+d(us)$
$\Sigma^+=u(us)$, $\Lambda^0=u(us)+d(ds)-2s(ud)$, $\Xi^-=s(ds)$, $\Xi^0=s(us)$

Ω^-によって$SU(3)$が確立されると、早速クォークモデルが提唱された。クォークモデルによれば、バリオンは三つのqから作られることはすで

$I=3/2, S=0$	Δ^-		Δ^0		Δ^+		Δ^{++}
$I=1, S=-1$		Σ^*		Σ^{*0}		Σ^{*+}	
$I=1/2, S=-2$			Ξ^{*-}		Ξ^{*+}		
$I=0, S=-3$				Ω^-			

10.3　バリオンの10個組

に述べたが、例えば27の組はできない（3×3×3＝1＋8＋8＋10と分解される）。だからクォークモデルでは、$SU(3)$をさらに制限し、実際の現象を説明しやすくする。

ゲルマン－大久保の公式についても同じことが言える。ハドロンの質量差は、クォークの質量差でだいたい決まると考えればよい。sクォークはu、dクォークよりも重いというふうに。するとストレンジ粒子は、sクォークの数に比例して重くなるはずである。またuとdの間でも、dの方が少し重いとすればnがpより重いことも理解できる。

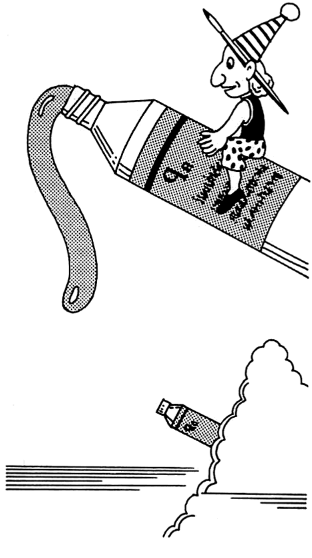
もっと大きなところに目をつけて、メソンとバリオンを比べたらどうだろう。メソンは$q\bar{q}$、バリオンはqqqだから、バリオンの方が重いはずで、これはよいが、質量の比が二対三とはならない。だいたい、メソンの中でも、π、K、ηの間の質量差が、平均質量と同じくらい大きい。定量的な話になると、そう簡単にはゆかないのである。

クォークモデルが出たはじめは、クォークの実在性をどこまで真剣に考えるべきかについて、かなりの不安があった。クォークの提唱者自身も、これは$SU(3)$の量子数を表す記号にすぎな

いかもしれないと言った。もしクォークが単独で存在しうるならば、このような問題は消えてしまうが、未だにクォークは見つかっていないから、疑問はやはり残っている。しかしクォークを普通の粒子と考えて思考を進めていく方法が、次から次へと成功をもたらしたので、クォークを単なる数学的記号とみなす人は現在はほとんどいないだろう。

クォークモデルはその後の発展、進化をとげてきた。その事情をこれから順を追って説明しよう。

11 クォークモデルの進化



クォーク複合系モデル

クォークはハドロンの$SU(3)$対称性を説明するために仮説として導入された実体であるが、それが一人前の実体としてみとめられるようになるまでには相当の時間がかかった。この事情は、原子の概念が仮説から出発して実在となるまでの長い過程を考えればもっともと思えるかもしれない。実をいうと今でもクォークの実体性に疑問をもつ人がないわけではない。その第一の理由はクォークが未だに「目に見えない」からである。しかしクォークをレプトンのような「目に見える」素粒子と同格に取り扱いうるためには、ほかにもいろいろな理論的なテストが必要である。そしてテストの結果に応じてクォークの性格を詳細に規定し、あるいは今までの仮定を適当に修正せねばならない。

ゲルマン－ツワイクの仮説に従えば、クォークは$SU(3)$の量子数を担う三個組をなすスピン

½のフェルミオン（フェルミ粒子。六八ページ）、つまりレプトンと同じような粒子だと考えられた。ハドロンはクォークの複合系であるから、組合せ方によって、アイソスピンやストレンジネスのみならず、いろいろなスピンの状態が作られるはずである。そして、それらはハドロンの励起共鳴状態をも表すであろう。ちょうど原子核や原子に多くの励起状態が存在して、それらのスペクトルが一定の法則に従うことから、相互作用の性質が推定されるように、ハドロンのスペクトルはクォークの相互作用を決める手がかりになる。

　そこで原子や原子核の理論を手本にして、クォーク複合系のモデルを作ってみよう。ハドロンはだいたい重さの似かよったクォークでできているから、比較するには原子よりも原子核の方が適当である。すなわちメソン$q\bar{q}$はデウテロン（重水素核）p n（陽子‐中性子）に相当し、バリオンq q qはトリトンp n nまたはヘリウム3核p p nに相当する。デウテロンとトリトンは普通の水素（p）の同位元素、ヘリウム3核は普通のヘリウム4（p p n n）の同位元素を作る。特に陽子と中性子をuとdのクォークで置き換えれば、トリトンとヘリウム3核は、クォークモデルにおける中性子と陽子の構成にそのまま相当する。すなわち

$$t = pnn \qquad He^3 = ppn$$

$$n = udd \qquad p = uud$$

それはともかくとして、原子核の構成を理解するための最初の出発点は、核子の間に到達距離

の短い引力が働いて、比較的ゆるく結合する、すなわち結合のエネルギーは核子の静止質量に比べて小さい（数パーセントのオーダー）、したがって核子の運動エネルギーも小さい、また引力は陽子と中性子のちがいにもよらず、それらのスピンの向きにもよらない、という仮定である。これによって原子核のいろいろなエネルギー状態のスペクトルのだいたいのようすが決まる。その次に陽子と中性子の差、スピン依存性などの補正を入れて、スペクトルの詳細が説明される。

同じことをクォークモデルについてやってみたらどうだろう、とは誰の頭にもすぐ浮かぶことではないか。実際このような考え方はギュルセイとラジカチおよび崎田文二により独立に発表されSU(6)の理論という名で流行になったが、物理学の諸原理を知りすぎている者には実は納得のいかぬ代物で、これをあえて仮定するにはやはり相当の勇気が必要である。

なぜかと言えば、もしハドロンがクォークのゆるい結合体ならば当然クォーク一個はハドロンより軽く、ハドロンをばらばらにしてクォークをとり出すことはむずかしくないはずである。例えばパイオンを二つのクォークに分解すれば、パイオンよりも軽いクォークが飛び出すだろうが、強い相互作用をもつ粒子の中ではパイオンが一番軽いものである。クォークが単独で見つかっていないところからすれば、クォーク自身はハドロンに比べて非常に重く、同時にハドロンの束縛エネルギーもこれを打ち消すだけ大きくなければならない。いわば、重い石が深い井戸の中に落ちたようなもので、なかなか石を外へとり出せないのであろう。しかしこんな狭くて深いポ

テンシャルは湯川の核力のような相対論的に正しい形には表せない。

原子核とのアナロジー

けれどもこれを未解決の問題として無視して、原子核とのアナロジーをともかく試してみよう。まずメソンであるが、クォーク間の力がスピンによらぬとすれば、エネルギーは相対的運動状態によって決まる。軌道角運動量 l が0の状態が最も低く、l が1、2、3、……と増すにつれてエネルギーも上がるのが常識である。$l=0$ の状態では二つのクォークのスピン½が逆向きか平行かによって全体のスピンは0か1かになる。パリティはマイナスで、0^-と1^-の状態ができることになる。これはすでにフェルミ－ヤンの理論（一二一ページ）のところで説明しておいたとおりである。三種のクォークの組合せ方によって$\bar{q}_i q_j$から$SU(3)$の八個組と一個組ができることも説明ずみだ。だから0^-の方はこれで片づく。1^-の方はベクトルメソンと呼ばれているもので、ω（オメガ）、ρ（ロー）、K^*、φ（ファイ）などの記号で表される共鳴状態に相当する。つまり0^-の次にくるメソンで、二つの0^-メソンにこわれることが知られている。

次にバリオンをしらべよう。最低状態は三つのクォークを軌道角運動量0の状態におけばよい。三つのスピンの組合せから、全スピンには½と3/2の可能性ができる。前者は普通のバリオンの八個組、後者は一〇個組にちがいない。しかしなぜスピンと$SU(3)$の間に相関があるのだろう

か。

ここで量子論的な統計の原理が偉力を発揮する。統計の原理（六七ページ）によればスピン$\frac{1}{2}$の粒子はフェルミオンで、フェルミ統計に従うべきである。すなわちクォークの複合状態は、その中の二粒子の入れ替えに対して反対称でなければならない。入れ替えの操作ではスピンも$SU(3)$のレッテル（u、d、s）も同時に入れ替えねばならぬので、この両者の間に制約が生ずるはずである。

先に述べたギュルセイ、ラジカチ、崎田の$SU(6)$理論というのは右のプログラムを実行したものである。彼らはクォークはスピンの向きを区別して全部で六種類あるとしてそれらの間の対称性を取り扱ったので$SU(6)$の名がついているわけである。

$SU(6)$の理論によればバリオンの八個組のスピンが$\frac{1}{2}$、一〇個組のスピンが$\frac{3}{2}$になるという相関は説明可能であるが、そのためには一つ非常に奇妙なことを仮定せねばならない。はじめにクォークがフェルミ統計に従うと考えて出発したのに、実はボース統計に従うごとく見えるのである。これを示すにはΩ^-（一三六ページ）の粒子を例にとるのがよい。Ω^-はスピン$\frac{3}{2}$でストレンジネスは-3だから、三つのsクォークのスピンが同じ方向にそろった状態と考えられる。しかしそれでは粒子の入れ替えに対して対称で、フェルミ統計の要請とは逆になってしまう。だがいったんこの矛盾を忘れて、ボース統計を仮定してしまえば、Ω^-のみならず他のバリオンの諸性質

(例えば磁気能率など）をうまく説明できるのである。

$SU(6)$の理論は表面的には成功したが、原理の上で不可解な点が多い。右の磁気能率の場合でも、クォークの質量が核子の⅓として、三つのクォークの磁気能率を足せばよいのだが、それでは原子核を核子に分解するがごとく、核子を簡単にクォークに分解できるはずである。しかしそんなクォークは存在しない。ボース統計に従うボソン（ボース粒子。六八ページ）のごとくふるまい、ゆるく結合していても引きはなせないクォークでは、実在としての影がいっそう薄くなってしまうではないか。これを何とか解決せねばならない。

結合エネルギーに関する困難の解決はあとまわしにして、ここでは統計問題だけをとり上げよう。最初に出された提案はグリーンバーグによるもので、クォークは普通の統計則に従わぬという単刀直入式のものである。もっとくわしく言えば、同じ状態に一個しか入れぬフェルミ統計の代わりに、三個まで許す、次数3のパラフェルミ統計が適用されると考える。このような統計は理論的にはすでに知られていたが、実際問題としてとり上げられたのは初めてである。

けれども、これは対症療法のようなもので、バリオンの問題を解くだけならばあまり説得力がない。ほかに独立なテストの方法がほしいが、幸いにして次のような過程が考えられる。すなわちqと$\bar{q}$の対を発生する反応、例えばe^+とe^-からメソンを作るような場合には、パラフェルミ統計の次数が3ということは、普通のフェルミオンの種類が三倍になったのと同じことで、結局反

応確率、または断面積が普通の計算の三倍になるのである。

クォークは色と香りで区別する

しかし、そうならばむしろ普通のフェルミオンのクォークの数を三倍にしてもよいではないか。三倍という意味はu、d、sのクォークのそれぞれがまた三種類あることで、どれも同じ$SU(3)$の量子数をもち、それだけでは区別がつかない。つまり$SU(3)$の三個組が三つあるに等しい。ならべて書けば

$$\begin{matrix} u_1 & d_1 & s_1 \\ u_2 & d_2 & s_2 \\ u_3 & d_3 & s_3 \end{matrix}$$

となる。

このような考え方は、韓と南部、宮本、タフへリーゼなどの幾人かにより、それぞれ独立に発表された。右に基づけば、クォークは結局九つあって、それらを完全に区別するには、縦の座標と横の座標とを同時に使えばよい。前者は在来の$SU(3)$量子数だが、後者は別個の新しい$SU(3)$と見なければならぬ。この新しい量子数は、後に「色」（カラー）と呼ばれるようになったものである。色に対して、古い方の量子数は「香り」または「フレーバー」（flavor）と呼ばれ

る。

色は三原色、赤、緑、青、または赤、黄、青などとしてもよいが、香りとu、d、sなどの記号との対応はしっくりしない。しかも現在では香りの種類は三つではなく、c、bなどが登場してきたことはすでに触れたし、後にも立ち入って説明するつもりである。

九個のクォークによる模型

ハドロンの問題にもどろう。九個のクォークからどんなハドロンが作られるかを考える。クォークの種類がふえたのだから、メソンやバリオンの数もふえるはずであるが、すでに今までの三種の香りだけで十分だったのだから、これではちょっと困るではないか。ただしバリオンの場合にはフェルミ統計の制約は守らねばならないが。

答を先に述べてしまうと、従来のハドロンはすべて「色なし」または「白色」の状態に相当すると考えるべきである。白色は三原色が同じ割合で混ざったものであるように、ハドロンでも三つの色を平等

香り(種) ＼ 色(類)	赤	青	緑
アップ	u_1	u_2	u_3
ダウン	d_1	d_2	d_3
ストレンジ	s_1	s_2	s_3
チャーム	c_1	c_2	c_3
ボトム	b_1	b_2	b_3

11.1　クォークの色（類）と香り（種）による分類

に使う。バリオンの場合は赤（R）、緑（G）、青（B）のクォークを一つずつ使って $q_R q_G q_B$ というようにし、次にR、G、Bの順序について適当に平均（重ね合せ）すればよい。メソンについては、常に同じ色のqと $\bar{q}$ を $q_R \bar{q}_R$ のごとく組み合わせ、これらを平均する。

このように、ハドロンは常に白色だと仮定すれば、統計の困難は救われるが、それだけが目的なのではまことに人為的と言わねばならないであろう。色のある状態、すなわち三色が任意の割合で混じった状態を禁止する理由がなければ、ハドロンの種類はうんとふえてしまう。

そこでもし理由があるとすれば、それは力学的なものであると考えるのが自然であろう。つまり色のある状態も存在するが、それは白色の状態よりずっと重く、現在の実験ではまだ作れないと考えるのである。原子の場合と比較すれば、これはもっとわかりやすくなる。白色とはプラスの電荷とマイナスの電荷が打ち消し合った中性の状態、つまりイオン化しない原子に相当し、色のある状態は正味の電荷をもつイオンだと考えればよい。明らかにイオンの方がエネルギーが高く、中性原子にもどろうとする傾向がある。それはなぜかというと、電荷の間にはクーロン力が働くからである。

このアナロジーを色に適用したらどうだろう。クォークの色に比例するクーロン力のようなものが存在して、白色の場合にそれが0になるという理論が作れないだろうか。幸いにして、このような目的にかなうおあつらえ向きの理論が、ヤン - ミルズの理論として知られている。これは

パリティ非保存の話に出てきたヤンがミルズといっしょに一九五四年に発明したもので、現在は非アーベル型のゲージ場（非アーベル場）の理論と一般に呼ばれているものであるが、詳細については章を改めて論ずることにしよう。

色のあるハドロンはないのか

それはともかく、たとえ中性の原子と白色のハドロンとの間にうまくアナロジーが成立したとしても、これで問題が片づいたわけではない。原子をイオン化できるように、白色のハドロンをイオン化して色のあるものに変えられるはずである。ただ、そのためには大きなエネルギーが要ると仮定したままでである。

ではどれだけのエネルギーが要るだろうか。言いかえれば、色のある状態の質量はどれくらいだろうか。これらの中には単独のクォーク自身も含まれているから、すでに議論した遊離クォークの問題とも密接に関連してくる。

そこで色のあるハドロンが存在するかどうか、そもそも三色のクォークが存在するかどうかをテストするいろいろな方法を考えてみよう。もしハドロンをイオン化できるならば、ハドロン同士、またはハドロンとレプトンの衝突のエネルギーが、ある「しきい」を超せばイオン化反応が起こるから、反応断面積がふえ、新しい共鳴状態も見出されるかもしれない。つまり現在のハド

ロン反応よりはずっと大きいエネルギーのスケールのところで断面積が増大することが期待される。

クォーク自身も色のある状態の一つだと前に言ったが、ここで一つ重要な区別をせねばならない。クォークには色と香りがあり、香りの方はu、d、sの差別のごとく、電荷の差別をも含む。したがって、色のある状態の中には、一つはクォークのような分数電荷のものと、もう一つはメソンやバリオンの中の色の混合だけが変わって、電荷は相変わらず整数であるものとがある。だから前者は直接電荷を測ればただちに見分けられる。例えば粒子が泡箱の中を走る軌跡の濃さが電荷の二乗に比例することは前に述べておいた。

これに反し、電荷が整数の場合には、色があってもなくても、電磁的性質は同じだから、色があるかないかはそう簡単には見分けがつかない。

クォーク、整数荷電の可能性を追う

ひょっとしたらクォーク自身も実は整数荷電をもち、そのためになかなか見つからないのではなかろうか。この可能性は、色をもち込んだことによって自然に生まれてくる。つまり電荷は香りだけでなく、色にもよると考えればよろしい。個々のクォークは整数荷電だが、三色について平均したものが分数ならば、白色のハドロンの中のクォークは、あたかも色のないゲルマン、ツ

ワイクの分数荷電のクォークのようにふるまうであろう。

韓－南部モデルと言われるものがそれである。具体的に電荷の割当てを示せば図11・2のようになる。

香り＼色	u	d	s
赤	1	0	0
緑	1	0	0
青	0	−1	−1
平均	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$

11.2　韓－南部モデルによるクォークの電荷

この仮定によればクォークは普通のバリオンのようなもので、昔の坂田モデルに近くなってしまう。ただしクォークはおそらく質量が普通のバリオンよりはずっと重く、したがってバリオンとメソンなどに崩壊する不安定な粒子であるかもしれない。しかし今までのところ整数荷電にせよ分数荷電にせよ、また安定にせよ不安定にせよ、こんな粒子の証拠はなかったのである。

でもまださじを投げる必要はない。実は非常に有力なテストの方法が残っている。それは例の電子と陽電子のビームを衝突させてハドロンを作る反応である。この反応は

$$e^+ + e^- \longrightarrow \text{“}\gamma\text{”} \longrightarrow \text{“}q+\bar{q}\text{”} \longrightarrow \text{ハドロン}$$

（“ ”は仮の粒子を意味する）

の過程に従うもので、γを媒介として電子対がまずクォーク対に変わり、さらにクォーク対が強い相互作用によって、いくつかのハドロンになって出てくると考えられる。特定のクォーク対を作る反応の確

率（断面積）は十分高いエネルギーではその電荷の二乗に比例するから、出てくるハドロンの種類を問わない全確率は、あらゆるクォークの電荷の二乗を足したものに比例するであろう。例えばゲルマン‐ツワイク型のクォークu、d、sの三種を考えれば電荷の二乗の和は、

$$R=(2/3)^2+(-1/3)^2+(-1/3)^2=2/3$$

だが、もし色が三色あれば全部で九種のクォークについて足さねばならない。すなわち $R=2$ になる。これに反して韓‐南部型のクォークの場合には、一五一ページの表からただちに $R=4$ となることがわかる（ただし白色でないハドロンを作る過程をも含めたことになっており、白色のハドロンだけに限れば R は前と同じく2であることが示せる）。

一九六〇年代には実験的には、エネルギーが二、三GeVまでのところでは R の値は2に近く、⅔でも4でもないことが知られていた。そしてこれは明らかに色をもった分数荷電のクォークを支持すると考えられていた。しかしエネルギーをもっとあげてやったらどうなるだろうか。

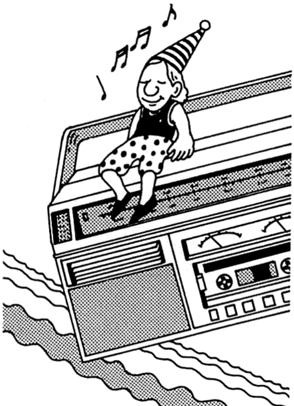
一九七〇年代にスタンフォードのSLAC（スラック）で四GeV＋四GeVの電子‐陽電子衝突型加速器SPEAR（スピア）が作られたが、その目的の中には右の問題も含まれていた。R を測ることは比較的やさしい。出てくるハドロンを何でもつかまえればよく、種類、性質をせんさくする必要がない。だからこの実験が最初に行われたが、その結果は少し奇妙で、エネルギーが四GeV以上になると R が4程度にふえることがわかった。すなわちゲルマン‐ツワイク型の三色クォークモデルで

はだめなのである。しかし韓‐南部型のクォークならば、白色ハドロンのみのときは $R=2$、色のあるハドロンも含めれば $R=4$ になるから、色のあるハドロンが四 GeV 以上で発生するとも考えられる。しかしこれは本当だろうか？

意外な事件 J/ψ

スタンフォードでは右の問題を解決すべく、もっと精密な実験が繰り返された。そして一九七四年に突然意外な事件が起こった。新粒子 J/ψ（ジェー・プサイ）の発見がそれである。J/ψ 粒子の正体がはっきりするまでにかなりの年月がかかったが、結局それは色をもったハドロンではなく、チャームと呼ばれる新しい香りのクォークからできた無色のハドロンということに落ちついた。そして、クォークは結局分数荷電をもつものであると信じられるようになった。次の章で J/ψ 粒子およびその後の新粒子族について語ることにしよう。

12 チャームとそれに続くもの



自然の奥深さを示すJ/ψ

クォークモデルは一九五〇年代から六〇年代のはじめまでに続々と発見されたハドロン族に秩序を与えるために導入されたもので、u、d、sの三種のクォークからすべてのハドロンが作られ、したがって宇宙の中の物質は三つのクォークと四つのレプトン（電子e、電子ニュートリノν_e、ミューオンμ、ミュー・ニュートリノν_μ）で尽きるかのように思われた。もしそうならば電子と陽子だけが知られていた二〇世紀のはじめ頃と比べて世の中が少し複雑にはなったが、これで素粒子物理は一段落をとげたと言えるであろう。そして、もしこの先があるならば、それは弱い相互作用を媒介する力の場とか、クォークの色に働く強い力の場とかを追究することであろう。

これらの力の場を取り扱う、いわゆるゲージ場の理論は、たしかに一九七〇年代に急に発展したものだが、それだけではなく、実はクォークやレプトンの種もまだ尽きてはいないことが実験

的に判明した。前章でちょっと紹介したJ/ψ（ジェー・プサイ）粒子がその先頭を切ったわけである。

J/ψ粒子はMIT（マサチューセッツ工科大学）のティンのグループと、SLAC（スタンフォード大学線形加速器）のリヒターのグループが独立に、しかもほとんど同時に発見したもので、その結果、彼らは一九七六年にノーベル賞を受けている。Jはティンの命名、ψはSLACグループの命名である。実験の方法が全くちがうけれども、作られた粒子が同一であることに疑いはない。

ティンの実験はBNL（ブルックヘーブン国立研究所）のAGS加速器（三〇GeV）を使って陽子をベリリウムの的に当て、$p+p$（陽子と陽子）の反応によって作られる中性ハドロンが$e^{+}+e^{-}$（陽電子と電子）にこわれるのを見るのである。なぜこんなことをやったかといえば、要するに新しいベクトルメソン探しであった。

ベクトルメソンとはスピンが1のメソン、クォークモデルによればqと$\bar{q}$のスピンが平行になった状態である。特に$u\bar{u}$、$d\bar{d}$、$s\bar{s}$の三種は電荷は0、ストレンジネスも0で、$e\bar{e}$（電子－陽電子）や$\mu\bar{\mu}$（ミューオン－反ミューオン）の組合せに類するものだから、ほかのハドロンにこわれる以外に

$$q+\bar{q}\longrightarrow``\gamma"\longrightarrow e+\bar{e},\ \ \mu+\bar{\mu}$$

などの過程でレプトン対にも崩壊しうる。実際に存在するρ^0、ω^0、φ^0（一四三ページ）のベクトルメソンは右の三つのクォーク-反クォーク$q\bar{q}$の状態の適当な組合せに相当すると考えられている。

しかしこれら以外にもっと重いベクトルメソンはないだろうか。もちろんメソンはベクトル型（スピン1）だけではないが、右の式が示すように、同じベクトル型の光子（"γ"）の中間状態を経て必ずレプトン対にこわれる可能性がある点でユニークである。だから高いエネルギーの電子の対をさがせばよいだろう。これがティンの目的と着眼点であった。ただし実験装置は大規模なものなので準備に数年もかかった。

ビームの陽子と的の中の陽子（または中性子）の衝突により

$$p+p\ (n) \longrightarrow v^0+x+y+\cdots\cdots$$

ティン Samuel C. C. Ting（一九三六〜）
リヒター Burton Richter（一九三一〜）
どちらもアメリカの実験物理学者。新粒子J/ψを独立に発見したことにより一九七六年ノーベル賞共同受賞。

ティンは現在マサチューセッツ工科大学教授だが、J粒子の実験はブルックヘーブン国立研究所で行われた。


ティン

その後ヨーロッパのデージやセルンでの実験にも関係している。J粒子は彼の名に当たる漢字（丁）にちなんだものらしい。

リヒターはSLAC（スラック）（スタンフォード大学線形加速器）の首脳部の一人で、電子衝

のようにベクトルメソンv^0が作られ、それがすぐe^+とe^-にこわれたとする。後者のエネルギーなどを測定すれば親の質量が決まる。

もちろんクォークと反クォークの対が共鳴状態になくてもミューオンの対に崩壊できるから、ミューオンのエネルギーは必ずしも一定ではないが、もし共鳴状態が存在すればそこに鋭い山ができるであろう。

新しいベクトルメソンvが存在するという保証はないし、もし存在しても、作られる確率が小さければバックグラウンドの中に埋もれて、山を見ることがむずかしい。ティンの実験は一つの冒険であった。

リヒターの実験の方は、一五五ページの式の逆反応を利用し陽電子（e^+）と電子（e^-）の衝突から作られるハドロンを見る点でユニークである。電子は強い相互作用をもたぬから、電磁的な相互作用を通してのみハドロンを作りうる。したがってこれらの相互作用をしらべるのにおあつ



リヒター

突ビーム装置スピアの企画、建設に特に貢献した。ψ粒子の発見に引き続き、ψ′、χ、Dなどチャーム・クォークを含んだメソンが次から次へと登場、また新しいレプトンのタウ（τ）も同じ研究所のパールにより発見された。

らえむきであり、衝突ビーム装置SPEAR（スピア）を強く推進したリヒターの功績を認めなければならない。たとえ共鳴状態が存在しなくとも、クォークの数に関する情報が得られることは前の章ですでに述べたとおりである。また後に紹介するワインバーグ－サラム理論によれば弱い相互作用を媒介するZ^0という特殊のベクトル粒子（ハドロンではないが）が存在し、これも光子やベクトルメソンと同じく陽電子－電子過程に寄与するはずである。陽電子－電子衝突ビーム装置のエネルギーをますます大きくしたものが次から次へと世界中で計画されているゆえんもそこにあるわけだ。

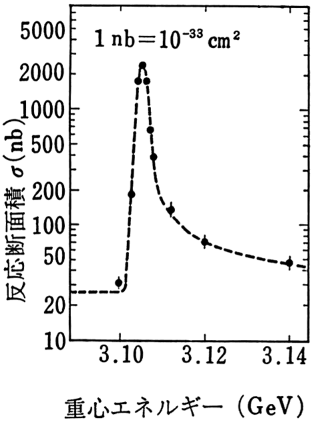
J/ψ粒子の正体

話をJ/ψ粒子にもどそう。このニュースがただちに新聞に報道され、学者のみならず、一般の人々の間にもセンセーションをまき起こしたのは、単にメソンがもう一個見つかったというだけではなく、その現れ方、特にSLAC（スラック）のデータがあまりにもドラマチックであったからだろう。

実験は陽電子と電子のビームがドーナツの中を反対向きに回り、ある場所で交叉する。交叉点のまわりは測定装置で何重にも囲まれ、出て来る粒子の軌跡がただちに記録されるようになっている。粒子の性質やエネルギーもわかる。図12・1を見ていただきたい。反応はぽつん、ぽつんと小雨のような調子で続くが、三・一〇五 GeV というエネルギーに達すると突然土砂降りに変

わる。反応断面積が数百万電子ボルトの狭い幅の間だけ一〇〇倍に跳び上がるのである。ラジオの受信にたとえれば、ダイヤルをいい加減にぐるぐる回しても雑音しか入らなかったのに、ある波長のところに正確に合わせればスピーカーが破れるほどのシグナルが現れるようなものである。

共鳴を特徴づける主なものは、高さと幅である。山の高さが高く、幅が狭ければドラマチックであるが、逆に低い、なだらかなのは、共鳴かどうかもはっきりわからない。もし共鳴ならば、山の面積はだいたい反応の性質とエネルギーで決まるから、高さと幅とは反比例する。狭ければそれだけ高いわけである。



12.1 J/ψの劇的な登場

既知のメソン、すなわちρ^0粒子、ω^0粒子、φ^0粒子のようなものも確かに大きな山を示すけれども、幅は一〇〇 MeV 程度もある。だからJ/ψ粒子の針のように鋭い山は、単にもう一つメソンが見つかったという以上のショックであった。

一般に共鳴の幅は、不確定性原理により、その寿命に反比例する。すなわち幅が狭ければ狭いほど寿命が長く、安定に近くなる。ほかのベクトルメソン

に比べてこんなに安定なJ/ψ粒子とはいったい何物であろうか。

J/ψ粒子の正体がはっきりするまでに二年ほどかかったが、それにはほかの実験データと、いろいろな理論的考察が必要であった。実験データの方を述べると、まずJ/ψ粒子のすぐ上に、これと同じような山（ψ'と呼ばれる）があることが、ψの一週間後に発見された。さらにエネルギーを上げると四GeVの前後に、もっと幅が広く普通のベクトルメソンに似た山がいくつか現れる。また共鳴以外のところでも、$e^+ + e^- \longrightarrow$ハドロンの全断面積は一般に高くなる（$R$が大きい）ことは一五二ページで述べたとおりである（実際のデータは一六七ページ図12・2に示してある）。

これらの山はみなスピン、パリティ、その他の量子数が光子と同じ共鳴状態であるが、ほかにχ（カイ）と呼ばれる異なったメソンのグループも間もなく発見された。カイ粒子はψ'が一個光子を放出することによって作られる。すなわち

$$\psi' \longrightarrow \chi + \gamma$$

で、質量はψとψ'の中間にある。さらに、ごく最近発見されたη_c（エータ・シー）粒子は、質量がプサイよりわずかに低く、スピン・パリティは0^-でπ^0やη^0に相当するものと考えられているが、やはりγ過程によってψ'から生ずる。

これらメソンの質量スペクトルをグラフにしてみると、三〜四GeVのあたりに集中して、ま

るで水素原子か何かのスペクトルのようである。現在通用している見方では、これらは第四番目のクォークc（チャーム）とその反粒子$\bar{c}$の複合状態のいろいろな準位に相当するもので、よく知られているポジトロニウム（電子と陽電子が水素原子のごとく結合したもの）になぞらえられる。ただし束縛力は電磁的なクーロン力ではなく、色に基づく力だと考えられている。

クォークモデルを完備させた第四番目のクォーク、c

cクォークの存在に基づく右の解釈はプサイ粒子やカイ粒子のデータだけから断定することはむずかしいが、これを決定的ならしめたのは一九七六年に発見されたDメソンの族である。これらは質量がだいたいプサイ族の半分程度で、cクォークと普通のクォークu、d、sの複合状態だと考えられる。

$D^+ = c\bar{d}$, $\quad \bar{D}^- = d\bar{c}$

$D^0 = c\bar{u}$, $\quad \bar{D}^0 = u\bar{c}$

$D_s^+ = c\bar{s}$, $\quad \bar{D}_s^- = s\bar{c}$

ここでcクォークの電荷を指定せねばならないが、右の式からわかるように、cクォークはuクォークと同じく⅔の電荷をもつことになっている。Dのスピン・パリティはη_c粒子と同じく0^-、つまりパイオン、Kメソン、エータメソンηなどの兄弟に相当するわけである。またDより

少し重く、ロー粒子ρ、オメガ粒子ω、ファイ粒子φ、K^*粒子、プサイ粒子ψなどの兄弟分にあたる1^-のベクトルメソン、D^*もすでに知られている。

DメソンとKメソンとはよく似ている。Kメソンの中のsクォークをcクォークでおきかえればDメソンになる。sクォークがKメソンのストレンジネスを担っていたと同じ意味でcクォークはDメソンの新しい量子数「チャーム」を担っていると考えられる。だからD_sメソンの方はストレンジネスとチャームを同時に担っていることになる。

ストレンジネスやチャームが量子数として有用なのは、それらがほとんど保存される、すなわちクォークの香りは、弱い相互作用による以外には変化しないからである。したがってDメソン族は比較的に安定で、その崩壊はcクォークがsクォークに変わる過程、

$$c \longrightarrow s + \nu + \bar{e},\quad s + u + \bar{d}$$

などを通して起こると考えられる。

さて、cクォークの質量の問題だが、成分クォークの質量を足し合わせればだいたいハドロンの質量になることは前に述べておいた。この計算でゆくと、

$$D \sim 1.8\,\mathrm{GeV},\quad u,\ d \sim 0.3\,\mathrm{GeV}$$

から、

$$c \sim 1.8 - 0.3 = 1.5\,\mathrm{GeV}$$

という見積りが得られ、したがって、

$$\psi = c\bar{c} \sim 3\,\text{GeV}$$

はぴったりである。

右のようにすべてのことが少なくとも定性的にうまく説明できるので、チャーム・クォーク（c）の仮説が一般に受け入れられているのは無理からぬことであるが、チャームの概念の起源はプサイ粒子の発見よりもずっと古く、主として弱い相互作用を理解するために理論的に考え出されたものである。くわしいことは後の章にゆずるとして、ここでエッセンスだけを一口に言えば、「普通」のベータ崩壊は

$$u \longrightarrow d + \nu_e + \bar{e}$$

$$\mu \longrightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e$$

のように、クォークまたはレプトンの組（u、d）（μ、ν_μ）（e、ν_e）などの間での転換を引き起こすものである。そのためにはクォークもレプトンも偶数個だけの種（香り）があって、二つずつの組を作らねばならない。しかしそれではsクォークが一つ浮き上がってしまうから、sクォークの相棒となるもう一個のクォークcを仮定したい。すると（u、d）の組に対して（c、s）の組が生じ、電荷はどちらも（⅔、−⅓）となるべきである。

大胆な仮定だが、非常に簡単で説得力がある。しかし実際にはsクォークはdクォークにも転

換してV粒子の崩壊を起こすというように、弱い相互作用は複雑怪奇で、これらを完全に理解するためには、理論の発展は長い道をたどらねばならなかった。実験的にもcクォークが発見されるまでにはやはり一〇年もかかったわけである。

またしても自然は人知を出し抜いた

cクォークの発見によってクォークモデルは理論的に完備したから、これで事は終わりだろうか。もしそうならば、基本粒子は四種のレプトン（ν、e）（ν_μ、μ）と四種×三類のクォーク（u_i、d_i）（c_i、s_i）（i＝赤、緑、青）で出尽くしたことになる。

しかし自然はまたしても、われわれの単純な期待の裏をかいて、まだまだ新種が存在することを教えてくれた。

第一の事件は新しいレプトンτ（タウ、ただし一一〇ページに出てきたタウとは別のもの）の発見で、SLAC（スラック）のパールたちのグループによりなされた。実験はやはりSPEAR（スピア）を使った電子‐陽電子の反応だが、その生成物の中にミューオンμのようなレプトンでミューオンより質量が重く、一・八GeVもある粒子を見つけたのである。崩壊は

$$\tau \longrightarrow \begin{cases} \nu_\tau + \mu + \bar{\nu}_\mu \\ \nu_\tau + e + \bar{\nu}_e \end{cases}$$

で、ミューオンの場合と緊密に対応している。ν_τはτと組になる新しいニュートリノである。レプトンが六種になったのだから、クォークの方も六種あってもよさそうである。その予想を裏書きするがごとく、レーダーマンたちのグループは一九七七年にJ/ψ粒子の上を行く重いメソンを発見してΥ（ウプシロン）と名づけた。実際はティンの場合と同じ陽子-陽子反応で、FERMILAB（フェルミラブ）（フェルミ国立加速器研究所）の四〇〇GeV陽子加速器が使われた。その後電子-陽電子反応においても、ハンブルグやコーネル大学の装置により、ウプシロン粒子Υのみならずその上の励起状態Υ'、Υ''などの存在も確立されたのである。

　このウプシロン族は質量が一〇GeV内外のところにあるから、その成分と考えられる第五番目のクォークの質量は五GeV程度だろう。そして今までの（u、d）（c、s）の例から類推すれば、次の組（t、b）の中のbに当たるとしてよさそうだ。tとbはトップ（top）とボトム（bottom）の意味でつけられた名前で、tは電荷が$\frac{2}{3}$、bは$-\frac{1}{3}$の成分である。またbが存在すればチャームの場合のDメソンのようにbと他のクォークを含んだメソン族も存在するはずで、これらも続いて発見され、Bメソンという名で呼ばれている。

　しかしtの方は発見が十数年も遅れた。それはtの質量が意外に重く、bの三〇倍以上もあるからで、まだほかの五つのクォークほどは詳しくしらべられていない（20章参照）。

電子-陽電子 ⟶ ハドロン　の断面積が、クォークの種の数を示すバロメーターであることは

前の章で述べた。もう一度説明を繰り返せば、あるエネルギーで作りうるクォークの種について、その電荷数の二乗の和をとれば、$e^+ + e^- \longrightarrow$ハドロンの全断面積の目安を与える。これが例の$R$（一五二ページ）という量である。$R$を（u、d、s）、（u、d、s、c）、（u、d、s、c、b）、（u、d、s、c、b、t）について計算してみれば、それぞれ

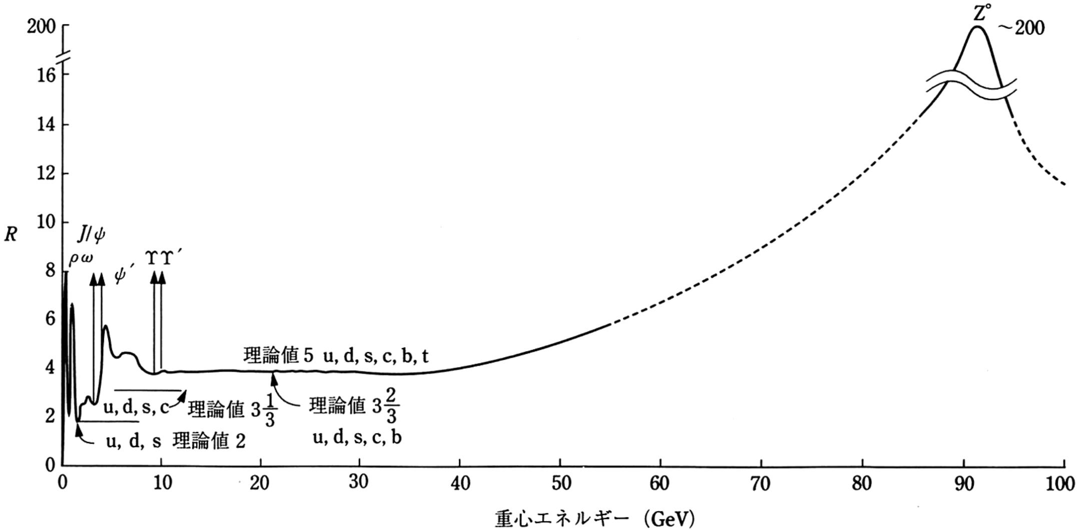
$$\left\{\left(\frac{2}{3}\right)^2+\left(-\frac{1}{3}\right)^2+\left(-\frac{1}{3}\right)^2\right\}\times 3=2$$

$$\left\{\left(\frac{2}{3}\right)^2+\left(-\frac{1}{3}\right)^2+\left(-\frac{1}{3}\right)^2+\left(\frac{2}{3}\right)^2\right\}\times 3=3\frac{1}{3}$$

$$\left\{\left(\frac{2}{3}\right)^2+\left(-\frac{1}{3}\right)^2+\left(-\frac{1}{3}\right)^2+\left(\frac{2}{3}\right)^2+\left(-\frac{1}{3}\right)^2\right\}\times 3=3\frac{2}{3}$$

$$\left\{\left(\frac{2}{3}\right)^2+\left(-\frac{1}{3}\right)^2+\left(-\frac{1}{3}\right)^2+\left(\frac{2}{3}\right)^2+\left(-\frac{1}{3}\right)^2+\left(\frac{2}{3}\right)^2\right\}\times 3=5$$

というようにだんだん上がっていく。実験値は図12・2に示すがごとくである。三GeVと九GeVのあたりで、プサイ粒子やウプシロン粒子の激しい共鳴が見られる以外は、右の理論値とだいたい合っていることがおわかりであろう。ずっと上に行くと九〇GeVあたりでまた鋭い山が現れるが、これは後の19章で詳しく述べるZ^0ボソンによるものである。



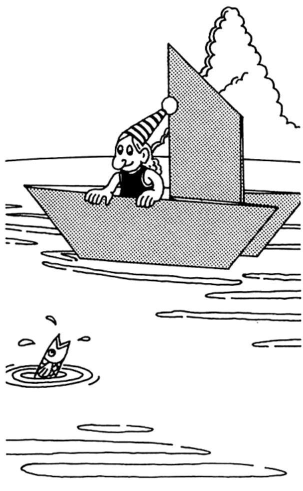
12.2 Rの変化。3 GeVと9 GeVのあたりでJ/ψとΥの激しい共鳴が見える。91 GeVの山は19章のZ^0によるもの。

レプトンもクォークも六種

この章で学んだことを要約しよう。クォークやレプトンの種が、一九六〇年代にクォークモデルが出たときよりはさらにふえ、現在どちらも六種類あることが知られている。それらはいつも二個組をなして、しかもレプトンとクォークの組が相伴って現れているようである。それで一般にレプトンの一組とクォークの一組を合わせて一世代または一家族と呼んでいる。つまり三つの世代が知られていることになるわけである。すなわち（u、d、e、ν_e）が第一世代、（c、s、μ、ν_μ）が第二世代、（t、b、τ、ν_τ）が第三世代である。

それでは世代の数は三つでおしまいなのか、それとももっと重い世代がまだ存在するのだろうか？　これに答えられる理論は残念ながらないし、これらの粒子の質量のちがいを説明する満足な理論もない。しかし最近のLEP（レップ）の実験から少なくとも今までのような質量の小さなニュートリノの数は三つしかないことがわかった。だから特別に重いニュートリノをもつ世代の可能性を別として、世代の数は三つであると言ってよいだろう。

13　ひも付きのクォーク



一つのパラドックス

話はまた前に立ちもどる。クォークモデルはハドロンの$SU(6)$対称性をうまく説明するのみならず、どんなスピンの状態が現れるかについても、$SU(6)$の理論によってある程度の成功が得られた。それによればハドロンはクォークがあたかもゆるく結合しているかのようにふるまう。しかしクォークは決して外にとび出さないのだから、これは明らかに一つのパラドックスである。

ハドロンの性質の中には、そのほかまだ言及しなかった重要なものがいくつかあり、クォークモデルはそれらをも説明できなければならない。しかしそのために、モデルに新しい要素とか仮定とかを付け加えるのはやむをえないであろう。これらの経験的事実と、それを説明する理論ないしモデルを紹介するのがこの章の目的である。

ハドロン同士を衝突させれば一般に弾性散乱のみならず、いくつかのハドロンの多重発生も起こる。エネルギーを変えれば反応の断面積は大きく振動し、共鳴状態、すなわちハドロンの励起状態の存在を示す。また、多重発生産物のエネルギー分布をしらべれば、高い励起状態のハドロンが少数個作られて、それがまたいくつかのハドロンに崩壊する場合が多いことも知られている。

ここで二つの質問を提出しよう。第一に、ハドロンの励起状態はいくつあるのだろう。エネルギーをどんどん上げていけば、共鳴がいつまでも限りなく繰り返されるのだろうか。第二に、エネルギーを上げたときに、反応の断面積はどう変わるだろう。また発生する粒子の数やエネルギー分布はどうだろう。

これらに対する答をまず図でながめよう。前に出た一〇二ページの図7・7がそれで、$\pi^+ + p \longrightarrow x$の全断面積がエネルギーとともにどう変わるかをプロットしてある。すなわち、

$$\pi^+ + p \longrightarrow x$$

で、xはあらゆる反応を含む。この図からわかることは、

(1) 共鳴は何度も繰り返されるが、高エネルギーではだんだん目立たなくなる。

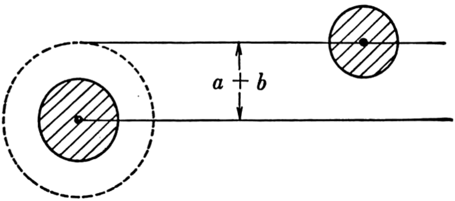
(2) 断面積は大局的には減少の傾向だが、最終的には一定の極限値に近づくように見える。

第二の点からコメントしよう。断面積が有限の値に近づくのはハドロンが一定の広がり（サイ

ズ）をもつからだと解釈される。半径 a のボールを半径 b の的の丸に当てるには、ボールの中心が的の中心から $a+b$ の半径以内に入ればよいから、断面積 σ（シグマ）は、

$$\sigma = \pi(a+b)^2$$

である。素粒子の場合には、波動としての広がりがさらに加わるから断面積はもっと大きくてもよいが、高いエネルギー、すなわち短い波長の極限では右のような古典力学的な解釈がだいたいあてはまる。だから σ の大きさから、ハドロンの半径は一フェルミ（10^{-13} センチメートル）の程度だと推論されるが、もちろんこれはすでにわかっていることである。



13.1　半径aのボールを半径bの的に当てるには……

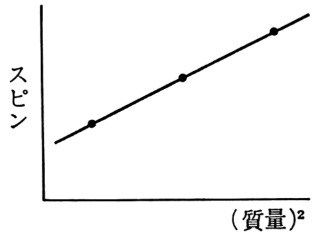
　次に共鳴のことだが、エネルギーとともに曲線がだんだんなめらかになるのは、必ずしも共鳴状態がなくなることを意味しない。高いエネルギーではたくさんの反応が可能だから、そのどれか（一定の角運動量状態）に共鳴が生じても、それは全断面積のごく一部にすぎず、バックグラウンドの中に埋もれて見えなくなる可能性もあるし、また幅の広い共鳴が次から次へと重なって現れれば、平均化されてしまうかもしれない。

それはともかく、これらの共鳴状態にどんな規則性があるだろうか。まず知りたいのはエネルギー（質量）とスピンである。スピンすなわち共鳴状態の角運動量は散乱の角分布を分析して決められる。前にも述べたように、角運動量が大きいほど散乱が角度によってひんぱんに変動するのである。

質量（静止エネルギー）の二乗とスピンとの関係をプロットしたものはレッジェ軌道と呼ばれている。事の起こりはイタリアのレッジェ（T. Regge）の立てた散乱の理論なのだが、$\pi^+ + p$（すなわちアイソスピン＝$3/2$）の場合についてやってみれば図13・2のようにみごとな直線が得られる。スピン $j = 3/2$ のところはすでにおなじみの3－3共鳴である。そのあと二つとびに $j = 7/2, 11/2, \ldots\ldots$ と j が上がっている。

ほかの反応、例えば $\pi^- + p$ とか $K^- + p$ などについてもだいたい同様な結果が得られる。これらはそれぞれ内部量子数（ストレンジネス、アイソスピンなど）の異なったバリオン共鳴状態のレッジェ軌道に相当するわけである。メソンの共鳴（励起）状態については $\pi + \pi$ のような散乱を考えればよいだろうが、パイオン自身が不安定だから実際にはやれない。しかもスピン0、1、……の状態の存在がそれらの生成、崩壊の方から知られているので（例えば $p + p \longrightarrow \rho + \ldots\ldots$, $\rho \longrightarrow \pi + \pi$）レッジェ軌道をプロットしてやればやはり直線になる。

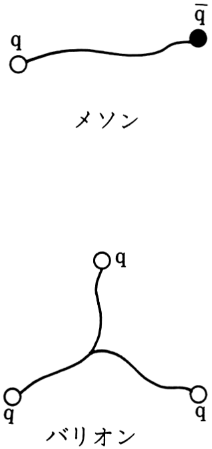
これらのレッジェ軌道は直線であるのみならず、お互いに平行である。つまりスピンとともに



13.2　レッジェ軌道

質量（の二乗）がふえる割合は同じで、最初の出発点だけが内部量子数によって異なるのである。このようなレッジェ軌道の普遍的性格は驚くべき事実で、何か深い理由がなければならぬ。直線がもしいつまでも続くならば、共鳴状態は無限大のスピン、無限大のエネルギーまで繰り返されることになるではないか。

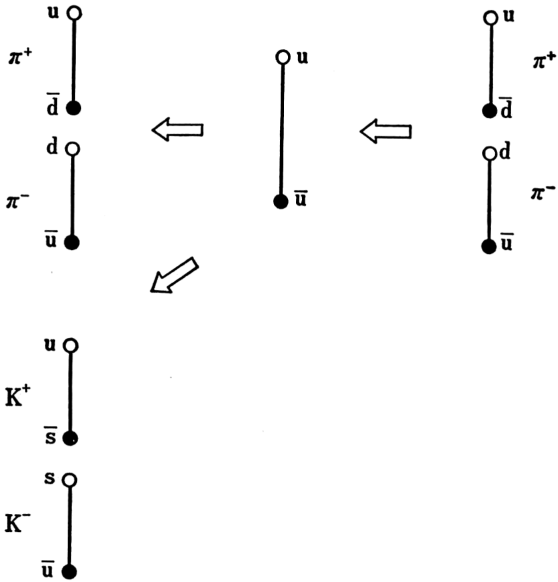
クォークモデルの立場で見れば、どんな高いエネルギーに達しても共鳴があるのはクォークがどうしても自由になれないことを裏書きしているように思われる。しかしもっと精密な説明がほしい。



13.3　ひもモデル

ハドロンのひもモデル

そこでレッジェ軌道の理論的な説明に移ろう。実際の発展経路をたどらずに結果からはじめた方が簡単である。ハドロンのひもモデル（または弦モデル）と呼ばれているのがそれである。このモデルによれば、ハドロンはクォークがゴムひものようなもので結ばれたものである。図13・3を見



13.4　2つのひもの切りつなぎ

ていただきたい。メソンとバリオンの構造を示したもので、ひもの端には必ずクォークがついている。ゴムひもとちがうのは、引っぱれば際限なく伸びるが張力は一定であること。いわば「くも」の糸のようなものである。またひもが切れることも可能で、そのときには切れ目にクォーク、反クォークの対が発生すると考える。

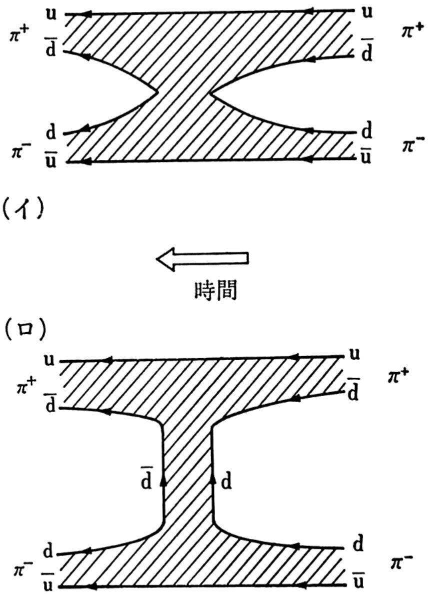
　メソンの内部運動を考察してみよう。ひもが伸びたり縮んだりして、ヨーヨーのような運動をすることも可能だが、くさり鎌とかハンマー投げの場合のようにぐるぐる振り回してもよい。このときには遠心力と張

力がつり合って、棒を振り回すのと変わりがない。エネルギー＝質量の原理にしたがって、ひもの各点に貯えられた張力のエネルギー＝ひもの質量密度、と考えれば、つり合いの式は簡単に求まる。ひもの長さは、端の運動が光の速度以上に達することができないことで制約され、ゆっくり回すほど長くなるという奇妙な結果が出るが、ひもの全エネルギーEと角運動量lの関係をしらべると、正しく、

$$l \propto E^2$$

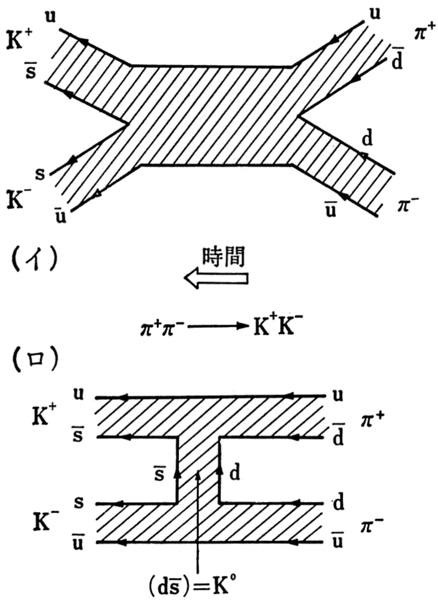
となる。この比例定数は張力で決まるから、レッジェ軌道の傾斜は普遍だとの結論が導かれるのである。

　バリオンの議論はメソンの場合ほど簡単ではない。だいたい三つのひもをなぜ一七三ページの図13・3のように結ぶのかと質問もしたくなるだろうが、これはひもの概念を色のゲージ場と関係づける要求から生まれたもので、今は省略しておこう。



13.5　π^+とπ^-の間にメソン$d\bar{d}$が交換される

次にひもを切ったり、つないだりする過程を説明せねばならない。これはハドロンの反応の記述に非常に有用な役割を果たすものである。例えばπ^+メソンとπ^-メソンの散乱を考えよう。このとき$\pi^+ = u\bar{d}$と$\pi^- = d\bar{u}$の端同士がくっついて$u\bar{u}$または$d\bar{d}$の対が消滅し、一時的に単一のひもが生ずるが、それがまた切れて二つのメソンになるのが散乱過程なのである。



13.6　2つのメソンの間に1つのKメソンが交換される過程

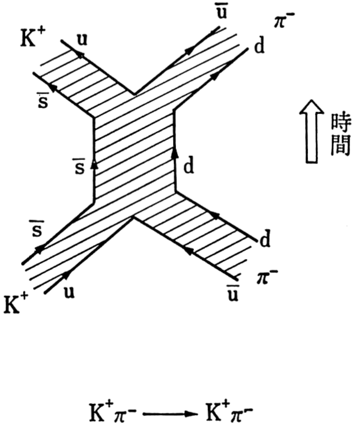
例えば最後のメソンは$\pi^+\pi^-$とは限らず、$K^+ = u\bar{s}$と$K^- = s\bar{u}$、または$K^0 = d\bar{s}$と$K^0 = s\bar{d}$でもよい。

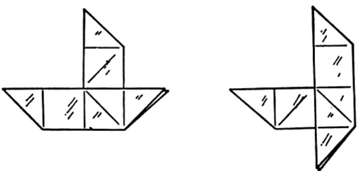
右の場合の二つのひもの運動を時間的に追ったのが図13・5(イ)である。一つのひもが時間の方向に流れてテープを作る。そのふちがクォークの流れである。そして二つのテープはシャム双生

児のように一時ひっついて一つになっている。

図を少しずつ変形していけば、図13・6(ロ)が得られる。これは二つのメソンの間にもう一つのKメソンが交換される過程にほかならない。とりもなおさず湯川的記述である。さらにもっと変形し、九〇度回転してみれば、今度はK^+メソンとπ^-メソンのひもの散乱を表す図になってしまう(図13・7。ただし矢印の向きを変えた粒子を反粒子と解釈し直せることに注意)。

筆者は子供のころ、「だまし舟」という折り紙が大好きだった。みなさんがたぶん御承知のように、帆かけ舟の帆がいつの間にかへさきに変わるという代物なのだが、ハドロンの散乱もだま

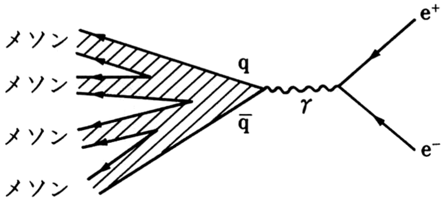




13.7　ハドロンの散乱はだまし舟のごとく……

し舟みたいなものである。専門家の術語ではいかめしく「双対性」と呼ばれている。

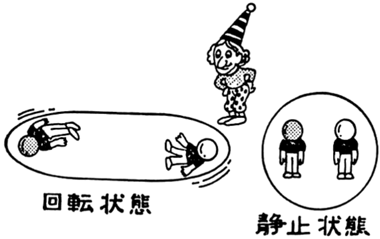
ひものモデルを陽電子と電子の反応に応用してみよう。このとき $e^+e^- \longrightarrow \gamma \longrightarrow q\bar{q}$ で作られたクォーク対が高いエネルギーで反対方向に弾き出されるとする。しかし q と $\bar{q}$ の間にはひもがついているから、ひもが切れなかったらいつかは引きもどされてしまう。しかしひもがずたずたにちぎれてしまうかもしれない。すると一本一本がメソンになって出てくるのである。チューインガムのひもを作って、それを急に引っぱってごらんなさい。三つにちぎるのはむずかしいだろうが、ハドロンの場合は、エネルギーを高くすればちぎれの数、すなわち多重度はだんだんとふえる。



13.8　陽電子－電子反応

ひもとは何か

ひもの実体は何だろうか。後にくわしく述べるように、現在信じられているところでは、電場の力線がしぼられたようなものである。しかし説明のためには磁力線を考えた方がわかりやすい。ひもは磁力にたとえられ、クォークはその極にあたる。棒磁石を二つに切れば、それぞれが



ふくろにはいったクォーク

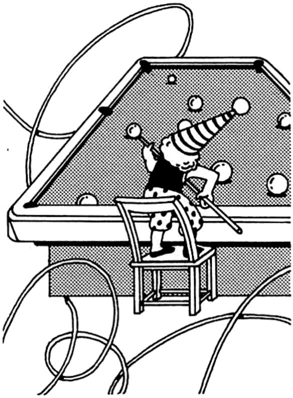
また一個の磁石になり、北極と南極を孤立させることは絶対にできない。だから単独のクォークは存在しないのである。
　右のアナロジーに意味があるとすれば、ひもは数学的な線ではなく、多少の厚みをもつと考えた方がよさそうである。特に短いひも、すなわち低エネルギーの状態は長さも厚さも同じくらいで等方的だとするのが自然であろう。このような状態を扱うために考え出されたモデルがジョンソンのバッグ（ふくろ）モデルである。これによればハドロンはゴム風船の中にクォークを閉じこめたようなものとされる。もしこの風船を速く回転すれば遠心力のために飛行船の形に変わるだろう。これがひもにほかならないのである。

14 パートンとは

ハドロンは軟らかい

ハドロンの性格は複雑である。ひもモデルで何でも片づくわけではなく、これと全く矛盾する一面も備えている。この章では、いわば性格分裂者のハドロンのもう一つの面を語ることにしよう。

ハドロン‐ハドロンの散乱は高いエネルギーでは共鳴がなくなり、断面積がなめらかになることを前の章で述べた。このなめらかで何の変化もない退屈なところを論じようというのである。実験によってだんだん明らかになったことだが、このエネルギー領域でのハドロンのふるまいは、いわばこれ以上退屈にできないほど徹底的に退屈なのだ。



高エネルギーで主に起こる反応はハドロンの多重発生である。例えばCERN（セルン）やFERMILAB（フェルミラブ）の陽子‐陽子反応では平均一〇個程度のハドロンが生まれるが、その大部分は

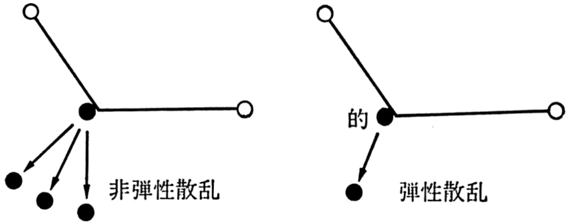
パイオンである。このような場合、生成物を統計的に扱って、例えば粒子のエネルギー分布を見るのが最も実験的に容易で、また分析もしやすい。

実際に反応がどんなふうに見えるかを説明しよう。反対向きに走る陽子と陽子が衝突すれば、それぞれが多くの破片（ハドロン）にこわれるが、破片が側方に飛び散ることはあまりなく、前方と後方にジェットができる。そしてジェットの広がり方は入射エネルギーに反比例する。これはハドロンがふわふわした軟らかいものである証拠である。

原子の構造を確立したラザフォードの推論を思い出していただきたい。ラザフォードはアルファ粒子が原子と衝突するとき、大角度の散乱がよく起こるのは、原子の中に小さい重い核があるからだと推論したのであるが、今の場合は事情が逆になっている。つまりハドロンの中に固い芯がないから、衝突の際あまり運動を妨げられずに惰性（運動量）によって前方に突進するのであろう。

それではハドロンの中のクォークはどうなったのだろうか。ラザフォード散乱のようにクォークとクォークが衝突することはないのだろうか。もちろんひももモデルによれば事情はだいぶちがうが、ジェットができることは、ひもがこま切れになってしまうことを意味するから、その説明が必要である。

この問題に光明を投げかけるデータが一九六七〜八年頃SLAC（スラック）から出てきた。それはハド



14.1　弾性散乱と非弾性散乱

ロン-ハドロンの散乱ではなく、二〇GeVの電子線形加速器を使う電子-陽子の反応である。実は、この方が陽子-陽子反応よりもラザフォードの実験によく対応している。点状のアルファ粒子（ヘリウム原子核）を広がった原子にあてて、後者の構造をさぐる代わりに、点状の電子を広がった陽子にあてるわけである（もちろん広がりのスケールが全くちがうが）。しかも電子は強い相互作用をもたず、電磁的性質ははっきり知られているから理論的分析に都合がよい。

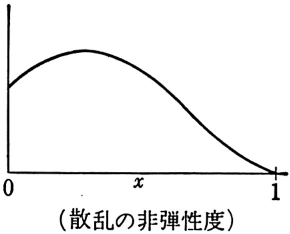
　この種の実験はホフスタッターが原子核の中の電荷分布をしらべるためにスタンフォード大学で古くからやっており、彼はその功績でノーベル賞を受けたのだが、彼の場合は弾性散乱（衝突する粒子の内部構造は変わらず運動の方向だけが変わるような衝突）で、今度の場合は非弾性、すなわち陽子が多くのハドロンを放出する過程である点がちがっている。実験で測定するのは反応の後の電子のエネルギーと方向である。陽子がどうなったかは問わないのだが、もし弾性散乱ならば電子のエネルギーは散乱方向によって一意に決ま

る。もし陽子をぶちこわそうと思えばそれだけ余分のエネルギーが要るから、同じ方向に電子が散乱されてもそのエネルギーは弾性散乱の場合よりも小さいであろう。したがって一定方向に出る電子のエネルギー分布は陽子のこわれ方の分布を反映するのである。

無限小の点粒子

実験の結果、スケール則という単純な法則が見出された。一口に言えば、ある入射エネルギーで散乱電子のエネルギーと角度分布を測れば、入射エネルギーを変えたときの結果は散乱電子のエネルギーを適当に換算したものになるという事実である。言いかえれば、エネルギーによって適当にスケールを変えればあらゆるデータが単一の曲線に乗ってしまう。その事情を図14・2に示してある。横軸のxは散乱の非弾性度を反映するもので、$x＝1$は弾性散乱、$x＝0$は完全非弾性散乱、すなわち電子が陽子にくっついてしまうのに相当する。

　このスケール則は、実は実験よりも前に理論家のビョーケンが予測していたので一般にビョーケンのスケール則と呼ばれている。その意味するところは、結局、ハドロンの内部には決ま



14.2　ビョーケンのスケール則

ったスケールがないということである。再び原子の例をとれば、原子は全体のサイズと原子核のサイズの二段階のスケールをもっている。量子論では長さのスケールはエネルギーの逆スケールであるから、段階が二つあれば低いエネルギーと高いエネルギーとで現象が本質的にちがいうる。ところが、スケールが一種類ならば、どこまでエネルギーを上げても新しいことは起こらないはずである。強いて第二のスケールは何かと言えば無限大とすべきであろう。すなわちハドロンの中に構成粒子があれば、それは無限小の点粒子だと考えられる。

ファインマンのパートンモデル

これをもっと具体的にしたモデルがファインマンによって提出された。ファインマンはいわゆるファインマン・ダイヤグラムの創始者としてよく知られ

ファインマン Richard P. Feynman（一九一八〜一九八八）



ニューヨーク生まれ。一九四二年プリンストン大学で学位をとった。原爆のマンハッタン計画に参加。物理については、横紙破り的なスタイルで新しい見方を展開し、ファインマンの関数積分と言われる方法で量子力学を定義することを提唱した。現在ではこれがむしろオーソドックスになろうとしている。また、それからの自然な帰結として、反粒子は未来から過去に走る粒子という考え方を見出し、さらにファインマン・ダイヤグラムという今日の標準的計算法を発明した。一九六五年、朝永、シュ

ているが、ここで彼の出した仮説は、ハドロンが多くの粒子の寄せ集めだというのである。彼はこれらにパートン（parton、すなわち部分粒子）と名をつけた。

パートンモデルによる電子‐陽子反応の説明は次のようになる。陽子はいわばパートンのガスであって、反応はその中の任意の一個が電子と衝突して弾き出される過程である。一つのパートンは決まった質量をもたず、重いパートンから軽いパートンまであらゆる種類が一定の割合で混じっている。しかもその数も決まっておらず、ただパートンのエネルギーの総和が陽子のエネルギーになればよい。電子と陽子が衝突するとき、実は電子とパートンの一つとが衝突して後者が弾き出されるのだが、電子の散乱角とエネルギーの関係は相手のパートンの重さによって変わる（重さのいろいろちがうビリヤードボールでゲームをするようなものだ）。だから一八三ページの図14・2の曲線はパートンのエネルギー（質量）の分布を反映していると見られる。xの大きいところは重いパートン、小さいところは軽いパートンとの衝突に相当するから、図からわかるように陽子の中に

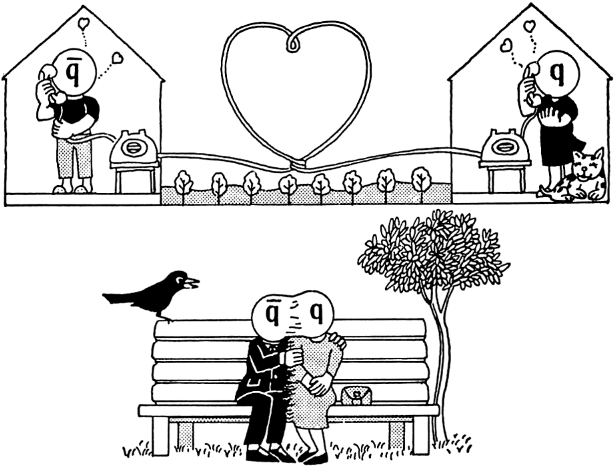
ウィンガーとともにノーベル賞受賞。ほかの有名な業績は、ファインマン‐ゲルマンのVマイナスA理論（一九五七年）や、パートンモデル（一九六九年）などであろう。

ファインマンは自由奔放で、アメリカ的ウィットに富んだユニークな存在であった。学会などでは聴衆を魅惑するスターとなる。大学生用に書かれた物理の教科書も有名だが、消化するのは大変だ。

は軽いパートンが比較的たくさん詰まっていると言える。
この突飛なパートンモデルの強味は、スケール則を説明できるばかりでなく、実験データをパートンの確率分布に帰着させる点である。いったん分布が決まれば、これを電子 - 陽子散乱のみならず、例えば陽子 - 陽子散乱にも応用できる。このときはパートン同士の散乱を考えるわけで、やはり一種のスケール則が成り立つ。しかしこの際は散乱は電磁的なものではなく、強い相互作用によると考えねばならない。また測定するものは作られたハドロンのエネルギー分布である。軽いパートンの衝突によって低いエネルギーのハドロンがたくさん出ることは、電子 - 陽子反応の場合に似ている。

クォークモデルとの比較

パートンモデルの考え方と、今までに述べたハドロンのモデルの間には類似点もあるが、またお互いに相容れない点もあることは一見明らかである。まず、パートン＝クォーク とおくのは自然であろうが、パートンは数が決まっていない。陽子は三個のパートンだけから成るのではなく、小さな軽いパートンも含んでいる。しかもパートンは仮定により相互作用しないが、クォークはひもで結ばれているはずである。
電子 - 陽子散乱のデータでもう一つ問題がある。それはパートンの中には電荷をもたぬ中性の



遠ければひも，近ければグルーオン

ものもあるということである。中性パートンは電子と衝突できないが陽子の全エネルギーの一部を担っている。だから散乱電子だけを見ているとエネルギーのつじつまが合わなくなってくる。実際のデータによれば、平均として全エネルギーの半分は中性パートンが担っていると解釈せねばならない。

　こんなふうに、二つのモデルの間に矛盾があるのは、結局ハドロン自身の複雑な性格の反映であり、個々のモデルはそれぞれハドロンのある一面だけを記述しているのだと考えねばならないであろう。かつて坂田博士が強調されたごとく、モデルというものは最終的な理論ではない。その次にもっと本質的な理論が現れることを予期せねばならない。

　幸いにしてこの本質的段階はすでに到来した

ようである。後の章で解説するＱＣＤ（色のゲージ場の量子論）がそれであるが、右の矛盾がどう解釈されるかだけを一口であらかじめ説明しておこう。

中性のパートンは色のゲージ場の量子、すなわちグルーオンである。色のゲージ場によるクォーク間の力は電磁力とは異なり、遠距離では強く近距離では弱くなる傾向をもつ。ひもは遠距離での性質を表し、パートンは近距離での性質を特徴づけるものである。そしてパートンの数が不定なのは、絶えずグルーオンがクォーク、反クォークの対に転換したり、その逆が起こったりしているからである。

15 朝永・シュウィンガー・ファインマンのくりこみ理論



新しい現象を追うのにいそがしい素粒子物理

この本をここまで読まれた読者諸君はおそらく、素粒子物理はモデルの寄せ集めにすぎず、定性的にもろもろの事実を説明できても定量的に精密な答を出すことができないのみならず、すべてを系統的に導き出せるような根本理論がないという印象をもたれたのではなかろうか。

このような批判に反駁することはむずかしい。たとえばニュートン力学によって、日食の起こる時刻と場所を予言できたり、アインシュタインの一般相対論による水星の近日点の移動が一〇〇年につき四〇秒であることをちゃんと測定で確かめられるのと比べれば、素粒子物理は一般にずっと粗雑である。精密科学という名に値しないかもしれない。素粒子の世界ではそれよりもむしろ新しい現象や新しい実体を追うのにいそがしく、定性的な理解の方が先決問題なのである。

量子電磁力学

けれどもわれわれの能力が超精密の域にまで達しているような部門も素粒子物理の中に含まれている。それは量子電磁力学、略してQED（Quantum Electrodynamics）と呼ばれているもので、素粒子の電磁的性質を取り扱う。特に電子やミューオンなどのレプトンの電磁的性質については、理論的にも実験的にも非常に高い精度が得られ、しかも両方の値はぴたりと一致して文句のつけようがないのである。

その代表的な例は電子の磁気能率である。これはディラック方程式から出てくる素朴な結論——すなわちボーア・マグネトンの二倍の値——よりわずかにずれていて、次のような補正因子がかかる。

実験値　1.0011596652198
理論値　1.0011596652140

朝永振一郎（一九〇六～一九七九）



東京に生まれ、京都で育つ。父は哲学者、朝永三十郎。年齢も環境も湯川秀樹博士と近く、同じ素粒子論に進んで一生のライバルとなった。東京の理化学研究所の一部である仁科研究室に入り、さらにドイツのハイゼンベルクの下に留学した点は湯川博士とちがう。

戦争中（一九四三年以来）超多時間理論というものを徐々に展開され、これが一九四七年に至ってくりこみ理論の完成、ラム・シフトなどへの応用となって実を結んだ。一九六五年シュウィンガー、ファインマンとともにノーベル賞受賞。そのほか仁科博士とコンビで宇宙線物理に貢献し、ま

このような精度の高い測定をやり遂げる実験家の腕もさることながら、ＱＥＤによる計算も大変な規模である。この方面の権威、木下東一郎博士（コーネル大学）によれば、彼が精度を上げるべくやっている計算は大コンピュータを使って数百時間もかかるという。

こんな大努力を人が惜しまないのはＱＥＤが全面的に信頼されているからである。逆に言って、もしどこかで破綻が生ずれば、それ自体が大発見となるだろう（右の磁気能率の値のわずかなずれは本当のものだとは考えられていない）。このＱＥＤは朝永、シュウィンガー、ファインマン、ダイソンなどの人たちによって一九四〇年代に完成されたもので、素粒子論に取り組む理論家にとっては一つの手本となるべき理論形式である。

無限大の自己エネルギー

ＱＥＤの本質は「くりこみ」の概念に存する。くりこみは朝永博士の命名で、利息を元金にくりこむという場合の使い方と同じだと思えばよい。英語ではリノーマリゼーション（renormal-

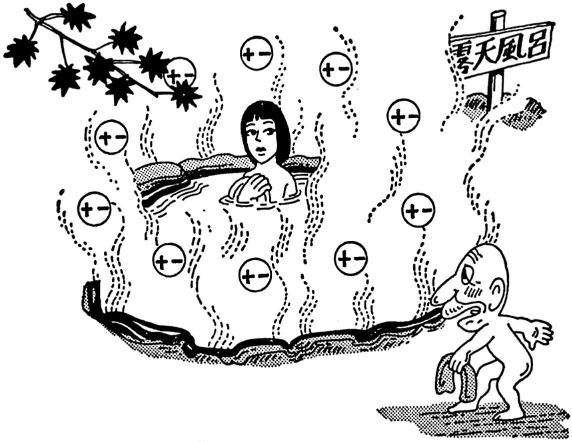
た戦争中は軍事研究の一部として磁電管の理論、立体回路（導波管）の理論などを出された。学生をよく指導し、直弟子を多く作られた功績も大きい。繊細な日本的感覚の持主で、一年間のアメリカ生活（一九四九年プリンストンで）は苦労だったらしい。「天国に島流しになったようだ」と弟子たちに洩らされた。

ization）と言うが、「くりこみ」の方がずっと味があるようだ。

それはともかく、QEDは電子と電磁場の相互作用を量子力学的に取り扱い、電子についてはディラック方程式、電磁場についてはマックスウェルの方程式が基礎になる。量子論的効果の一つの現れは、電子が仮の光子を放出したり吸収したり、また光子が仮の電子対に転換したり、元へもどったりする一時的過程が絶えず起こっていることである。その結果として二つの電子の間に光子が交換されて電磁力を生ずるのであるが、光子が同じ電子によって放出、再吸収されることもある。これは電子の電荷が自分自身に働きかける現象で、そのために電子は電磁的自己エネルギーという一種のポテンシャル・エネルギー（位置エネルギー）をもつことになり、したがって電子の質量ははじめからの機械的質量と電磁的自己質量の和だと考えられる。

この問題は古典的な電磁力学でも現れ、古くローレンツが彼の有名な電子論でくわしくとり上げたものである。いま半径rの金属の球に全電荷eを帯びさせると、その要素の間のクーロン斥力のためにe^2/rのオーダーの自己エネルギーが生ずる。だからrを小さくしてゆけば自己エネルギーはいくらでも大きくなってしまう。電子の半径を一フェルミ（10^{-13}センチメートル）程度とすれば、電子の自己エネルギーは実際の電子質量と同じくらいになるので、ローレンツはこれが電子の大きさで、質量は全部電磁エネルギーによるという考えを提唱した。

しかしそうならば電子はすでに構造をもち、点粒子ではないことになる。もし本当の素粒子が

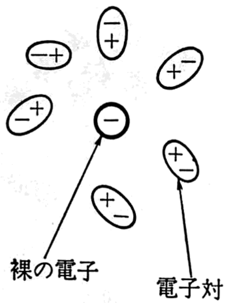


裸の電荷は見えない

あれば点でなくてはならず、結局、無限大の自己エネルギーをさけることはできないであろう。

しかし場の量子論に基づけば結果は少しちがうことを一九三〇年代にワイスコップが発見した。すなわち点電子のまわりの電磁場が仮の電子対の雲を作るために事実上電荷が広がっている状態を呈する（図15・1）。この広がり方は自己エネルギーを有限にはしないが、無限大の度は対数的になり、非常におだやかである。

ローレンツの考えを適用しようとすれば、電子の大きさは10^{-13}センチメートルの代わりに10^{-30}センチメートル程度にしかならない。こんな小さい領域は到底現在の素粒子物理の及ぶところではないから忘れてもよいといえばそれまでだが、原理の問題としては無視するわけにはいかない。のみならず電子の散乱断面積などの計算を先まで進めてゆ



15.1　点電子のまわりの仮の電子対

くと、無限大の量がやはり現れてしまうので量子電磁力学はナンセンスだとの結論も出かねない。

あきらめの効用——くりこみ理論

この困難を克服してQEDを救ったのが、朝永、シュウィンガー、ファインマン、ダイソンの理論である。その精神を一口で説明するには、朝永博士がときどき使われた「放棄の原理」という表現を引用するのが適当だと思う。その意味するところは、理論が完全で何でも計算できるという期待を放棄して、できるものとできないものをはっきり分けるや

シュウィンガー　Julian Schwinger（一九一八〜一九九四）



ニューヨーク市生まれ。いわゆる神童で、コロンビア大学のラビ教授に見出され、一七歳で論文を書き出し、二一歳で博士号をとった。一九四七年量子電磁力学を独立に展開し、ラム・シフト、電子異常磁気能率などの説明に成功した。そのため二九歳でハーバード大学の正教授になり、次いで朝永、ファインマンとともにノーベル賞を受けた。戦時中は導波管の理論などに貢献し、また長年にわたってたくさんの弟子や協力者を出したことなど、朝永博士との類似点が多い。シュウィンガーの業績は若

り方、ある意味では東洋的あきらめを連想させる哲学である。

こんな哲学が物理学として成功したのは、計算できるものとできないものとの分離を厳密に数学的に実行しうることを朝永その他の人たちが示して見せたからである。この場合、計算できないものとは電子の質量（自己エネルギーを含めて）と電子の電荷の二つで、質量の方はすでに説明した。後者の意味は、また図15・1にもどるが、点電子のまわりに誘起された電子対が、はじめの電荷との力のために分極して、電子は遠くへ逃げ、陽電子は近くに群がる傾向を示す、すなわち最初の点電荷がまわりの雲でおおわれて正味の電荷が減ってしまう。この減り方を計算すると実は無限大というナンセンスな答が出るのである。

しかし朝永博士たちの指摘したところによれば、実際の観測にかかるのは全質量と全電荷であって、それらを裸の分と雲による分とに区別できない。だから雲の分が無限大であっても、それを裸の分にくりこんだ全体が実際の質量と電荷であると解釈すれば無限大がうまく処理できる。いわば元金が無限大の黒字、利子が無限大の赤字で、正味は有限ということにしてやりくりするわけである。

朝永博士たちのＱＥＤが一種の対症療法であることは否定できないかもしれない。けれどもそ

いときから枚挙にいとまがないほどだが、数理物理的傾向が強い。

の結果としてどんな電磁的過程についても答が出せ、必要とあれば計算の精度をいくらでも上げられる。さきにあげた磁気能率（一九〇ページ）とか、有名なラム・シフトと呼ばれる現象をぴたりと定量的に説明してみせたのである。

この成功の原因の一部には電荷eが比較的小さいという偶然の事情もある。QEDでは電磁力の強さを表すパラメータはゾンマーフェルトの微細構造定数 $e^2/\hbar c=1/137$ である。例えば一個の光子の放出、再吸収が起こるごとにこの係数がかかるから、多くの光子が関与する過程は押さえられる。すなわち1/137 のベキ級数に展開する摂動論の方法が有効なわけである（先に述べた異常磁気能率の木下博士の大計算は 1/137 の四乗の項に相当する）。

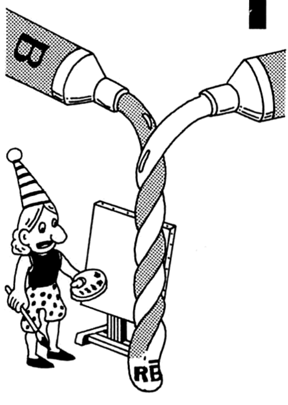
けれども自然界に存在するのは電磁的な相互作用ばかりでないことはすでに学んだとおりだ。だからQEDの成功を他の相互作用にも適用しようと試みるのは当然であろう。しかしこれは言うはやすくして実行はなかなかむずかしい。

その理由は、まず強い相互作用も弱い相互作用も非常に複雑で正体がよくわからない。またどちらも到達距離の短い力で、電磁場の場合と全くちがっているが、くりこみ理論が一般に効かない。また強い相互作用はその強さのゆえに摂動論的近似というQEDの計算方法が役に立たない。重力場の量子論は今問題にしてはいないけれども、これもくりこみ理論では歯がたたないことがわかっている。

こんなわけで理論家たちは二〇年間暗中模索を続けた。そしてくりこみ理論にいくつかの新しい要素を添加することによって、やっと解決の道が開けたのである。

次の章では強い相互作用を、その後で弱い相互作用をとり上げることにする。

16 QCD——色の量子力学



メソン論から色力学へ

湯川のメソン論の目的は核力を説明することであった。核力がメソンの交換によって生ずるという解釈は今でも成り立つが、メソンの種類は無数にあり、核力を基本方程式から定量的に導き出すことは望めない。これはしかしクォークモデルから見れば当然のことで、核力を論ずるのは複雑な分子の化学的性質を論ずるようなものである。原子は原子核と電子の間のクーロン力によって作られるものだが、二つの中性原子の間にはもはやクーロン力は働かず、相互偏極とか電子交換などの複雑な力がとって代わる。

ハドロンが色について中性のクォーク原子の状態であるという考えはすでに11章で紹介しておいた。色が原子の場合の電荷に相当し、クーロン力のようなものがクォークの色の間に働くとするわけである。このような力は湯川的な核力より基本的で簡単であるかもしれない。しかし電荷

は一種類であったのに対し、色は三種類あるから電荷の概念の拡張を必要とする。
マックスウェルの電磁場理論の特徴を一般化したものは「ゲージ場」の理論と今日呼ばれているものである。ヤンとミルズが最初に提唱したので「ヤン‐ミルズ場」とも呼ばれる。しかし意味をさらに広げて、アインシュタインの重力場理論などをも含めてゲージ場ということもある。
ではゲージ場の特徴は何であろうか。

ゲージ場とは

第一にゲージ場の作る力は到達距離が長く、クーロン力や重力のように逆二乗の法則に従う（距離の二乗に反比例する）のが原則である。
第二に力はその源のもつ量子数に比例し、その量子数につき保存則が成り立つ。電磁場の場合の電荷はその例である。
この二つの性質は論理的に関連しているのみならず、これらの要請からゲージ場の方程式が定まってしまうのが非常に重要な点で、その意味では、電荷の保存を要求すればマックスウェル理論以外の理論は作り得ないと言えるのである。しかしゲージ場の中には電磁場のような「アーベル的」なもの（アーベル場）と、それ以外の「非アーベル的」なもの（非アーベル場）とを区別する必要がある。ヤン‐ミルズ場は後者だが、まず重力場を例に説明する方がわかりやすいだろ

う。アーベル場のときには、源の電荷から生じた力の場自身が電荷を帯びて源になることはない。しかしアインシュタインの重力場理論の根本的要請は、エネルギー＝質量で、すなわちあらゆる形のエネルギーが重力場の源になることである。

いま一つの天体がそのまわりに重力場を作ったとすれば、その強さは天体の質量に比例する。しかし重力場自身は空間の各点にポテンシャル・エネルギーを与えるから、各点がまた重力場の源となるというふうにこの過程は無限回繰り返されねばならない。その結果がアインシュタインの方程式であって、マックスウェルの方程式が線形であったのに対し、この場合は非線形である。すなわち二つの天体が作る重力場は、個々の天体による場の和とはならない。しかし実際問題としてその効果がほとんど見えないのは、重力場のポテンシャル・エネルギーが天体の質量に比べて非常に小さいからである。

色力学

次にヤン－ミルズ的な場に移ろう。色を量子数とするヤン－ミルズ場の理論をクロモダイナミックス（chromodynamics）という。直訳すれば、「色力学」である。色は仮定により三種——赤、緑、青——で、色をもったクォークの間には強い力が働くが、色が全体として飽和して白色になったシステムは活気を失ったハドロンである、というのがはじめの構想であった。これを実

現するにはどうすればよいだろうか。

単に三つの色に異なる「電荷」a、b、cをあてがうだけではだめである。白色＝中性、すなわち、

$$a+b+c=0$$

が要求されるが、それでは三つが同等にはならない。これをさけるには三原色の混合を表すときのように平面の上に正三角形を描き、その頂点が原色にあたるとする手も考えられるが、量子力学的にはまだ満足でない。それは三色のクォークを波として混ぜることに関する対称性、すなわち色の$SU(3)$対称性を実現せねばならないからで、そのためには赤いクォークが青や緑に変わるような過程も許さねばならない。

結果として八種類のゲージ場が必要になる。これらの場は自身が複合色をもっていて、八つあるのは香り$SU(3)$（u、d、sクォーク）の場合に八道説が成り立ったのと同じ理由なのだが、もう一度説明してみよう。

クォークをひっつける糊——グルーオン

色のゲージ場の量子はグルーオン（gluon）と呼ばれている。色の場はクォークをひっつける糊（glue）だと考えられるからであるが、色子や糊子などと訳するのはまずいからやめておく。

さて、いまクォークがグルーオンを一個放出する過程を考える。その結果、赤（R）のクォークが青（B）に変わったとすれば、グルーオンはクォークから赤を奪い、青を与えた、あるいは赤（R）と反青（$\bar{\mathrm{B}}$）とをもち去ったと考えることができる。すなわちこのグルーオンは$\mathrm{R}\bar{\mathrm{B}}$の複合色をもっているわけである。一般に q_i が q_j になるとき放出されるグルーオン G_{ij} はあたかも q_i と q_j の複合状態

$$G_{ij} \sim q_i \bar{q}_j$$

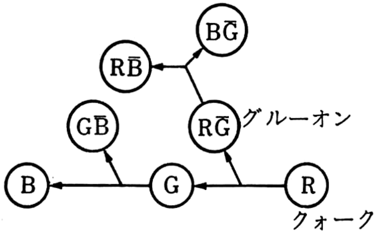
のようにふるまう（図16・1）。このような組合せの数は 3×3=9 だが、九種のグルーオンの中、その特別の重ね合せ

$$G_W \sim q_R\bar{q}_R + q_G\bar{q}_G + q_B\bar{q}_B = 0$$

は白色の状態に相当する。しかし白色の状態には糊が効かないことをもともと要請したのだから $G_W = 0$ とおかねばならぬ。したがって独立なグルーオンの種類は八個になる。

グルーオン自身が色をもっているから、グルーオンがまたグルーオンを放出する過程が存在することはすぐおわかりであろう。図16・1に示したのがそれである。この事情は重力場の場合と似ていて、色のゲージ場を非アーベル的ならしめるゆえんである。非アーベル的とはもともと「非可換」を意味する。例えば q_R がグルーオン $G_{R\bar{G}}$、$G_{G\bar{B}}$ を次々に放出すれば q_G を経て q_B に変わるが、順序を逆にした過程は起こり得ない。これがすなわち非可換性である。

電磁場の場合の単位電荷 e に相当して、クォークのもつ色の強さは一つの単位 g で表される。これは色の種類によらない量である。二つの電子の間に光子が交換されて生ずる電磁力が e^2 に比例するように、二つのクォークの間にグルーオン一個が交換されれば g^2 に比例する力が生ずるであろう。しかしグルーオンの種類によってクォークは色を変えたり、交換したり、いろいろな可能性が生ずる。その上グルーオンがまたグルーオンを生んだり、一個以上のグルーオンを交換したりする可能性を考慮すれば、g^4、g^6、……に比例する力も出てくる。



16.1　クォークの色とグルーオン

電磁力では $e^2/\hbar c$ が小さいので e^2 に比例するクーロン力だけでだいたいの話が片づいたが、グルーオンの場合 g はずっと大きいことを予想せねばならないから事態は簡単ではない。ただし全体として白色になるような状態では、構成分子のクォークや反クォークの間に引力が働いて安定になる傾向を示すことは事実である。

漸近的自由性

ＱＣＤ（Quantum Chromodynamics）とは色のゲージ場の量子論のことである。ＱＥＤ（量子電磁力学）の場合と比べて、電子をクォークで、光子をグルーオンでおきかえたものと考えればよい。

しかし果たしてこれで強い相互作用が満足に説明できるだろうか。第一、ハドロンの中からグルーオンが光のごとく放射される現象が存在しないではないか。白色の状態が安定になる傾向をもつと言ったくらいでは納得しかねるであろう。

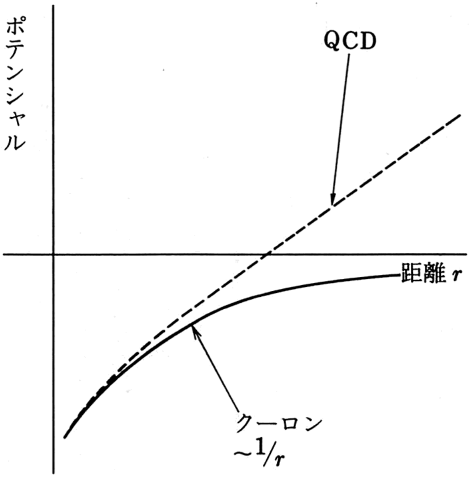
一九七三年ごろ新しい理論的進歩が起こった。それはＱＣＤのもつ漸近的自由性(asymptotic freedom) という不思議な性質の発見である。トホフト（オランダ）、グロスとウイルチェク（アメリカ）、ポリツァー（アメリカ）の独立な仕事であるが、いずれもまだ学生か学位とり立ての新進気鋭の人たちであった。

漸近的自由性は一般に非アーベル場（ヤン－ミルズ場）量子論の大きな特徴と考えてよい。15章ですでに説明したごとく、ＱＥＤの場合には裸の点電荷のまわりに電子対の雲ができて、もとの電荷を遮蔽（しゃへい）する傾向があるため、裸の電荷は正味の電荷より大きいのだが、非アーベル場では傾向が反対になる。すなわち場がまた場を生むという特質によって、裸の「電荷」のまわりに同じ符号の電荷がくっつき、遠くから見るほど正味がふえる。逆に言えば電荷の芯をさがすべく雲をかきわけて近づくと、影がだんだんうすくなってゆうれいのようについに消えてしまうことになる。あるいはエネルギーに直して表現すれば、エネルギーを上げて短距離における力をしらべようとするとだんだんクーロン力の場合より弱くなってくる。これが漸近的自由の意味なのである。

こんな奇妙なことはくりこみ理論からの数学的帰結であるが、直観的に理解しがたい。右に述べた若い人たちがあえて計算してみるまで誰も予期しなかったのは無理もない（もっともヤン－ミルズ場にくりこみを適用すること自体に数学的困難があり、それが解決されるまで相当の年月を経たことも事実であるが）。

QCDにもどって漸近的自由性の意義を検討してみよう。クォークの色が作る力の場はクーロン的だと最初考えたが、今言ったように色の強さが距離とともに変化し、近距離（高エネルギー）では弱く、遠距離（低エネルギー）では強くなる。これはクォークの性質を説明するのにまことに都合のよい傾向だと言わねばならない。すなわち高いエネルギーの現象ではクォークは自由パートンのごとくふるまい、低エネルギーにおいては逆に相互作用が非常に大きくなりうる。

もしクォーク間のポテンシャルが二〇六ページの図16・2のようだったら、ひもモデルと同じことになり、クォークは閉じこめられてしまう。二つのクォークを急に引きはなそうとすると、はじめは少しも抵抗がないが、そのうちに糊が効いてきて、糊のひもが切れない限り、ある程度以上にはなせない。グルーオン自身についても同じことが言える。グルーオンも色をもっているから単独では存在できないが、いくつかが集まって白色のグルーボールを作るかもしれない。これは整数スピンをもつからメソンに類するものだが、香りもなく、なかなかつかまえにくい代物であろう。存在の証拠がまだないのはそのためかもしれない。



16.2　クォーク間のポテンシャル

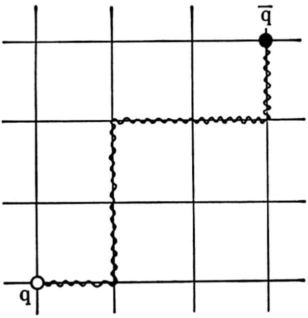
ＱＣＤは、こんな事情で、クォーク力学の基礎理論の有力な候補者と見られるようになったのであるが、まだまだ問題が解決されたわけではない。現在精密な予言ができるのは漸近的自由の成り立つ高エネルギー現象のみである。実際のエネルギーは無限大でないからクォークは完全に自由ではあり得ないが、それからの補正が計算できるのである。これは例えばスケール則からのずれとして観測され、理論とだいたい一致している。

　ここでちょっとおもしろい事実を付け加えておこう。ＱＣＤの漸近的自由性はグルーオンが逆遮蔽の性質をもつからだと言ったが、一つの源のまわりに生じるのはグルーオンの雲だけでなく、クォーク対の雲もある。そして後者はＱＥＤにおける電子対と同様に普通の遮蔽作用をするから、クォークの香りが一六種以上にふえるとグルーオンの雲に打ち勝って漸近的自由性が失われてしまう。現在知られているのは五種ないし六種だからまだ安全だが、実際に自然はクォーク

の数をこんな理由で制限しているのだろうか。

ウィルソンの格子理論とくりこみの新しい解釈

低エネルギー現象の方に移ろう。ここではＱＣＤの第一の問題はクォークの閉じこめが起こるかどうか、もし起これぱその正確なメカニズムは何か、である。しかし結合定数が大きくなるために数学的取り扱いがむずかしくなり、本当に満足な方法はまだ見つかっていない。けれどもモデルとして、ひもやふくろが実際に成功しているのにかんがみて、これらをＱＣＤの立場で解釈する努力が一般になされている。ウィルソンの格子理論というものをその有力な一例として紹介しておこう。



16.3　ウィルソンの格子理論

格子理論とは時間空間を連続体でなく、結晶のように離散した点の集まりと考える近似法であるが、ウィルソンの仮定では、クォークは格子点のどれかに居座り、ゲージ場の力線は一つの格子点から、となりの格子点への橋渡しをやる。例えば図16・3のごとくクォークqと反クォーク$\bar{q}$を配置すれば、両者は力線のひもでつながれ、そのエネルギーはひもの長さに比例する。ひもの通し方は無数にあり、量子力学的

にはこれらの通し方について一種の平均をとらねばならないが、結局においては$q\bar{q}$の距離が大きくなれば、その距離に比例するエネルギーが生じるという、ひもモデルの結果が得られるのである。

ウィルソンの格子理論は、ゲージ場理論だけでなく一般の量子場の理論において、結合定数が大きい場合の一つの計算テクニックであるばかりでなく、実はくりこみという概念に新しい解釈を与えた点で非常に重要なものである。それは次のような事情に基づいている。

いま、連続体の近似として、間隔lの格子を考えよう。この際、量子場の理論計算というのは、一つの場が格子の各点（ゲージ場の場合は格子点を結ぶ線）の上で定義されていて、その場のあらゆる値について適当な平均をとることを意味する。例えば格子上の一点aである値の場が発生した場合、aからLだけ離れている一点bで場のとる値の確率振幅を求めるには、a、b以外の点は問題にしないから、それらの点でのあらゆる値について平均をとればよい。しかしこれは当然Lがlよりも大きな場合しか取り扱うことができない。そこで今度はもとの格子の点を一つ飛びにとって、間隔$2l$の少し粗い格子を考えよう。l・格子から$2l$・格子に移るには、前者の中間の各点の値はどうでもよいとしてはじめからそれらについて全部平均をしておけばよい。この操作は間隔がLよりも小さい限り何回でも繰り返され、どの段階でもその現象の近似を与えるはずだ。しかし重要なのは、この操作でl・格子近似から$2l$・格子近似に移ると理論の中のパ

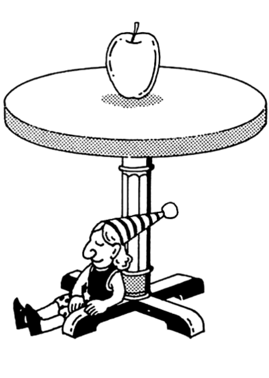
ラメータが変わることである。すなわち理論の中の定数は一般に定数ではなく、観測の分解能によって変化する。特にディメンションのない結合定数などは対数的にゆっくり変わる。

逆にl・格子を細分してだんだん小さい格子に移っていったらどうだろう。例えば固体の性質を記述するのには原子程度の大きさの格子から出発すればまず十分だ。理論の中には原子や結晶構造の性質がパラメータとして入っている。しかし一MeVものエネルギーでの現象では原子の中の原子核の性質が見えてくる。すなわち格子間隔を一〇〇万分の一に小さくとれば原子核の細かい性質を表すパラメータたちから出発せねばならない。これから格子を原子の大きさまで粗くしていくと、核子のパラメータの大部分は消えて原子としてのパラメータで置き換えられる。対数的に変わる結合定数だけがあまりドラマチックなことをしないわけであるが、それでも量子電磁力学の微細構造定数や自己エネルギーは無限大エネルギーではやはり無限大になる。すなわち量子電磁力学に無限大が現れたのは実は計算を無限大エネルギーでやっていたからで、実際問題にはこれらを実際のエネルギーでの値で置き換えねばならない。

これが「くりこみ」のウィルソン流の解釈で、素粒子物理だけでなく、固体物理などの分野でも広く使われている。しかし考えてみれば、これに似た事情は量子力学だけではなく、すでに古典力学でもわれわれにおなじみのことだ。ニュートンの運動法則の左辺には物体の質量が入って

いる。天体の運動でもボールの運動でも砂粒の運動でも、内部構造が問題にならず質点とみなしてよいような現象の場合には、それぞれの全質量を代入すればよい。また光が物質の中を通れば内部の原子一つ一つと相互作用をするが、それをいちいち記述しなくてもそれらの電気的性質の平均を反映するパラメータとして電媒定数と磁媒定数とをただマックスウェルの方程式に入れておけばよい。物理法則にはこういう一般的性質があるからこそ、大きなスケールの現象から得られた法則をだんだん小さな現象の探究にまである程度適用することができたし、その逆も成り立つのである。

17 対称性の自然破綻



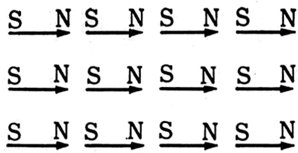
対称性とは何か

物理法則の中で対称性の原理が重要な役割を演ずることはよく知られているし、この本でもこれまでしばしば触れてきた。一つの対称性（または不変性）があれば、それに伴って一つの保存則が生じる。時空が平行移動について不変なことからエネルギーと運動量の保存則が生まれ、方向に関する対称性から角運動の保存則が生まれる。空間軸の反転、粒子と反粒子の入れ替えからはそれぞれPとCの保存が従う。uとdクォークの近似的対称性はアイソスピンの近似的保存を意味する、などなどと。

そこで右のような場合の対称性とは何かを少し深く考えてみれば、一般にいくつかの異なる状態が存在するが、物理法則の上からはどれも同等で本質的な区別がないことだ、と言ってもよいだろう。すなわち物理法則は一つの状態を他の同等な状態で置き換える対称操作に対して不変で

ある。

しかしいずれにしても、同等な状態同士、例えばAとA′を相対的に識別する必要がある。そのためにはAからA′に移る操作を適当に表現すればよく、それに使われるのが保存量、または量子数に相当するのである。



17.1　強磁性。原子磁石の向きが全部そろう

もし物理法則に一つの対称性をもてば、任意の状態Aをとったとき、それから対称操作で移れるすべての同等な状態もやはり存在可能でなければならない。例えばテーブルのまん中にりんごが上向きに置いてあっても、それを下向きにした状態や、別の場所に移した状態も原理的には可能であり、りんごの性質が変わるとは考えられない。

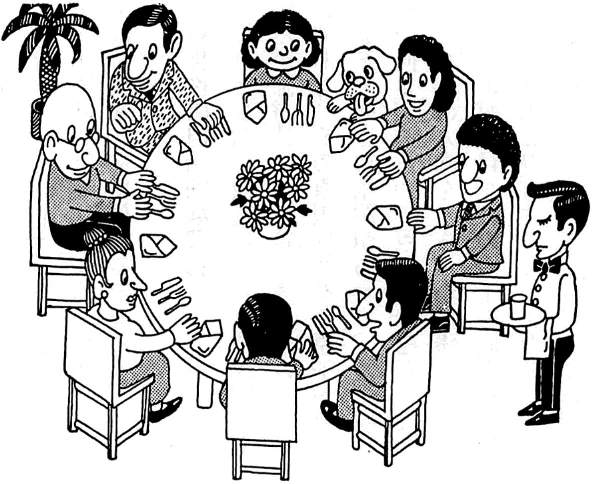
けれども状態の中には対称操作で不変なもの、つまり自分自身だけで一組をなすものがあってもよい。数学的な球はその中心のまわりの回転に対しては不変だから、異なった向きの球などということは無意味であるが、異なった場所に置けば区別される。ところが完全な真空、すなわち物質が何もない時空はどんな対称操作を施しても変わらないと考えられる（等方等質性。一〇六ページ）。だから真空はただ一個しかなく、その中に物質をつめこむことによって、初めて多様性が生まれると同時にエネルギーも高くなる。

場の量子論で宇宙全体の状態を指定しようとするときには、このような考察に基づいて真空とはエネルギーが最低で、かつあらゆる対称操作に対して不変な唯一の状態と仮定されるのである。もちろん宇宙全体でなくても、十分大きな真空の場所で外部からの影響が無視できれば事実上同じ定義があてはまるであろう。

対称性の自発的な破れ

けれども右の仮定はあくまで仮定であって自明のことではない。それを示すのによく引かれる例だが強磁性体の媒質を考えてみよう。強磁性体とは鉄やニッケルのごとく永久磁石を作れる物質である。その原因は個々の原子がその中の電子のスピンによって小さな磁石となるが、隣り合う原子の向きに相関があって、同じ向きの方が最もエネルギーが低い。したがって全部の原子磁石の向きがそろって巨視的な磁石になった状態が最も安定な基底状態なのである。けれども実際にどちらの方向をえらぶかは勝手である。少なくとも問題を理想化してそう考えてもよい。すなわちこの媒質は全部の原子の向きを一様に回転することに関して不変であり、基底状態は方向の数だけ無数に存在することになる。

磁石が有限の大きさならばこれは別に問題を起こさない。一つ向きの磁石があれば、向きだけがちがった同じような磁石も原理的には作りうるし、両方を共存させることもできる。けれども



自発的な破れ——サラムの比喩

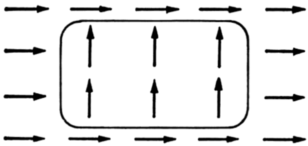
磁石が無限に広がっていたらどうだろう。われわれは常に一つの磁石の中に生き、その基底状態はどちらかの方向をとらねばならない。

このような場合、他の向きの基底状態に移るのにエネルギーは少しもいらないにもかかわらず、これを実行する手段がない。なぜならば、そのためには無限に広がった媒質のなかの原子をいっせいに回転させねばならぬが、有限の装置ではこれは不可能だからである。たかだかわれわれができるのは、媒質の一部分だけ向きを変えることであろう。しかしそうすれば媒質は歪みを生じ、もはや基底状態でなくなる。すなわちわれわれは一つの特定の向きをもつ世界の中に生き、その局所的な秩序の乱れだけを物理現象として観測できるのである。このような観測者にとっては対称性は自明のことではなくな

る。

右の現象は対称性の自発的な破れと呼ばれている。いまの例からわかるように、自発的な破れが起こるためには事実上無限大の自由度が必要であるが、そう言われてみれば日常の物理現象にいくらでも例が存在する。しかし一般原理として意識されるようになったのは、これを素粒子論に応用した南部 - イオナラシニオの理論（超伝導モデル）以来である。

サラムが使った人間的なたとえをここで紹介しておこう。宴会が開かれていて、大きな円いテーブルのまわりに大勢の客がぎっしり着席している。各々の席の前には皿、ナイフ、フォーク、ナプキンなどのセットがきちんと置いてあるが、隣の席との間隔が狭いので、どちら側のナプキンが自分に属するのかわからぬほど左右対称である。実際どちらをとってもかまわぬはずだが、誰か一人が右側のナプキンをとり上げれば他の客もそれにならっていっせいに右のをとらねばならなくなり、とたんに対称性が自発的に破れてしまうのである。



17.2　自発的な破れ。局所的な秩序の乱れだけを観測できる

自発的な破れのなごり——NG波

対称性が自発的に失われたのと、はじめから全くなかったのとは必ずしも同等ではない。磁石の例では対称性は磁石の方向の連続的、無限の

多様性に関し、宴会の例では右と左の有限、不連続な可能性に関するものであったが、前者のような連続対称性の場合には、それが破れたあとでも影になごりが残っている。

先に述べたように、磁石の中のすべての原子の向きをいっせいにねじる操作は困難だが、有限の領域内で行えば、その領域の大きさの波長をもつねじりの波（スピン波）が生ずるだろう。しかし波長を無限に大きくした極限を考えれば、はじめの対称操作に帰着するからエネルギーは0に近づくはずである。これは光や音のもつ性質と同じで、その波の量子には質量がないという特徴を示す。言いかえれば、いくらでも小さいエネルギーの量子が存在するわけで、これがすなわち破れた対称性のなごりなのである。

一般にこのような波は南部－ゴールストン（NG）波と呼ばれる。実際、固体の中を伝わる弾性波はその一例で、固体が平行移動に関する対称性を破っているためだと考えてよい。一つの原子が空間のどこに座っても原理的にはよいはずだが、結晶の中では、最初の原子が一点をえらべば、あとの原子はそこから等間隔で並ばねばならぬ。これを強いて乱そうとすれば弾性波が生じるのである。

超伝導も対称性の破れ

超伝導というのは、ある温度以下で物質の電気抵抗が完全に0になり、また磁場を外にはねつ

けるという現象で、極低温でこの性質を示す物質は多く知られている。超伝導が起こるメカニズムを理論的に説明することに成功したのは、バーディーン、クーパー、シュリーファー（イリノイ大学）の三人で、彼らの理論は俗にBCS理論と呼ばれている。

超伝導は対称性の破れがゲージ不変性（電荷の保存）という抽象的なものについて起こった場合として注目すべきのみならず、素粒子論のモデルになるという意味で実に重要なものである。

BCS理論を紹介するのはこの本の目的ではない。ここではわれわれに必要な要点だけを説明してみよう。電気伝導は媒質の中の電子の一部が自由に流動できるときに起きるものだが、超伝導の場合には電子のスピンが上向きのものと下向きのものとが対（クーパー対と呼ばれる）をなして、媒質の中に凝縮する。対の数は不定で、一つの場所から他の場所に流れても状態が乱されないから超伝導が生じると解釈できる。

その代わり、対をぶちこわすためにはある最小値E_0以上のエネルギーが必要で、その結果生じた個々の電子は、あたかも$E_0/2$の静止質量をもつ粒子のごとくふるまう。この質量は電子の本来の質量とは別で、超伝導体の中においてのみそれに追加される余分の量である。

右の事情は非常に示唆に富んでいる。もし一種の超伝導体が宇宙全体に広がっていて、われわれは常にその中に住んでいるとしたらどうだろう。元の真空を観測できないから、この媒質の基底状態が事実上の真空となる。元の真空で質量が0であった粒子（例えばニュートリノのごとき

もの）も、実際の世界では質量をもちうるであろう。電子やクォークの質量はこのようにして生じたのではなかろうか。

このアナロジーを最初に追究したのが南部－イオナラシニオ（NJL）の超伝導モデルであるが、その前に対称性の破れとの関係を明らかにしておかねばならぬ。

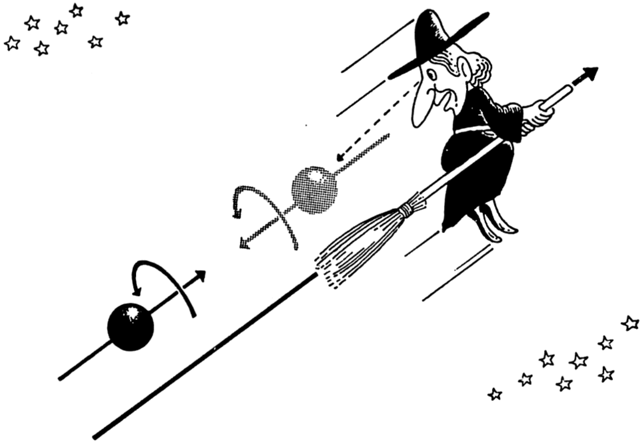
BCS理論で破っている対称性とは電荷の保存に関するものである。なぜかと言えば媒質の中のクーパー対の数が一定でなく、したがって電荷が多少ぼやけているからである。しかしぼやけ方はでたらめではなく、ちゃんと秩序がある。この秩序を指定するのに一つのパラメータを使うが、これは強磁性体の場合のスピンの向きに相当し、ある程度の任意性をもつ。

クォークの質量の由来――NJLモデル

そこで素粒子の問題に立ちもどろう。

NJLモデルはクォーク以前の理論なので、バリオンを超伝導体の中の電子になぞらえてその質量の起源を力学的に考えたのであるが、現代の基本粒子にあてはめればレプトンやクォークの質量も同様に取り扱いうる。ただしここで問題となる対称性は電荷に関するものではなく、カイラル対称性というものである。

カイラル（chiral）とは「手に関する」、つまり右利きと左利きの区別を意味する。一一



左巻きスピンを，追い越しながら見ると右巻きに見える

〜一一三ページでニュートリノにスピンが左巻きと右巻き（運動方向に対して）の二種類があることを述べたが、この二つはそれぞれカイラリティ±1をもつと呼ばれる。

実際の世界ではニュートリノνは左巻き、反ニュートリノ$\bar{\nu}$は右巻きのものしか存在しないためにパリティの破れが起こることはすでに説明したとおりである。けれどもこれは質量のないニュートリノに特有の事情で、もし質量があれば右、左両方の成分が存在せねばならない。なぜならば、質量をもつ粒子は光の速度以下でしか走れない。ある粒子のスピンが運動の方向に左巻きでも、それを追い越すような運動座標系から見れば運動方向が逆転して、右巻きに変わってしまうからである。

弱い相互作用の基本的性質はVマイナスA理論

というもので表される。これによれば弱い相互作用には一般に粒子の左巻き成分と、反粒子の右巻き成分のみが関与する。また粒子が反粒子に変わることもないから、全カイラリティ、すなわち〔左利き粒子の数－右利き粒子の数〕は相互作用の結果変わることはない。しかしニュートリノ以外の粒子は質量をもつから、それらが運動するときに左と右とが混じってしまい、結局カイラリティの保存が破れるのである。

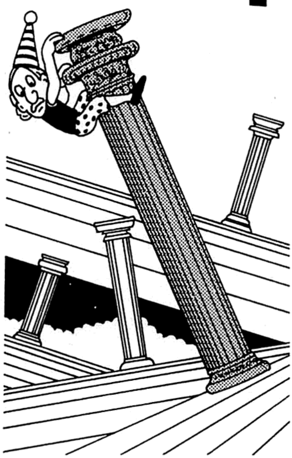
以上で超伝導体とのアナロジーがだいたいおわかりであろう。レプトンやクォークは元来は質量をもたないが、実際の世界ではそれが自発的に破れ、質量のある粒子として現れると考えるのである。しかしこれだけではあくまで一つの可能性にすぎない。ほかにもう少し理論的な支えがほしい。幸いにしてNG波の存在がそれを果たしてくれる。

BCS理論との対比を具体的にして説明すれば、この世界には粒子と反粒子（例えばqと$\bar{q}$）がカイラリティ0のクーパー対として沈澱している。一つの対をぶちこわせば質量のあるクォークと反クォークが発生する。また対の分布を少しかき乱せばNG波が生じるが、これはスピンが0、パリティがマイナス、すなわちパイオンなどと同じ性質をもつ。パイオンの質量が他のハドロンに比べて特に小さいのは、これがNG量子的な粒子だからではないか。

実際にはパイオンは三種類あるし、もっと重いKメソンやエータメソンηも同じスピン、パリティの粒子である。これらを一様に取り扱うには、カイラル対称性にクォークの香りの変化を含

め、またこれらのメソンの質量が完全に0でないのは、自発的な破れだけではない要素があると考えねばならない。この最後の点はいささか不愉快で、未だ完全に解決されてはいないが、カイラル対称性の自発的破綻はハドロン物理の解釈として成功しているばかりでなく、自発的破綻の概念は後に述べるゲージ場の統一理論の中の重要な基本概念ともなっているのである。

18 弱い相互作用の傾いた骨組



神の手抜き?

弱い相互作用はなかなか正体をつかみにくい代物である。それは単に結合定数が小さく、到達距離の短い相互作用だからだけではない。他の相互作用——重力、電磁力、強い力——がすべてゲージ理論の枠の中に入り、美しい対称性の原理に従うのに反し、弱い相互作用は非常に不規則で、完全な対称性は何一つもたないように見える。パリティ(P)の破れ、CPの破れ、ストレンジネスの破れなどはすでに6~8章でちょっと触れたが、実はこれだけにとどまらないのではないかという疑いが最近強くなってきている。私が弱い力の問題を考えるときいつも感ずることをまずここで披露しておきたい。

神が宇宙の設計をしたとき、重力、電磁力、強い力などの構成については公式に従って正確に図面をひいた。しかし弱い力に来たとき計算ちがいをしたのか、物指しを読みちがえたのか、図

面のところどころにくいちがいが生じてしまった。直線は垂直に交わらず、四辺形はうまく閉じない。そして弱い力の骨組が他の力の枠に対して少し傾いている。けれども遠くから見たのではあまり目立たないので、神はそれをそのまま使って宇宙を建ててしまった。

しかし科学者は万能の神がこんないい加減なことをするはずはないとの信念に立って、あらゆる現象の説明を求めようとする。骨組が傾いているのは不注意の失敗ではなく、然るべき理由があるからではなかろうか、と。

このような努力は二〇年間ほど執拗に続けられて、その結果弱い相互作用に関するわれわれの理解が大いに進歩した。ワインバーグ－サラムの理論によって弱い相互作用は組織化され、統一的に記述できるようになった。そして究極的にはこれも他の相互作用と同じく、ゲージ場の原理の上に立つという解釈が可能になったのである。しかしこの理論的発展をたどる前に、弱い相互作用の傾いた骨組とはどんなものかを説明せねばならない。

弱い相互作用とは

弱い相互作用はもともと原子核のベータ崩壊を意味したものだが、すでに学んだように、新しい素粒子にも拡張され、非常にバラエティの豊富なものになっている。例えば

$$n \longrightarrow p + e + \bar{\nu}_e \qquad (イ)$$

$$\Lambda \longrightarrow N + \pi \qquad (N = p, n) \qquad (ロ)$$

$$\Lambda \longrightarrow p + e + \bar{\nu}_e \qquad (ハ)$$

$$K \longrightarrow \pi + \pi \qquad (ニ)$$

$$K \longrightarrow \pi + \pi + \pi \qquad (ホ)$$

$$K^- \longrightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu \qquad (ヘ)$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu \qquad (ト)$$

$$\mu \longrightarrow \nu_\mu + e + \bar{\nu}_e \qquad (チ)$$

$$\mu + p \longrightarrow n + \nu_\mu \qquad (リ)$$

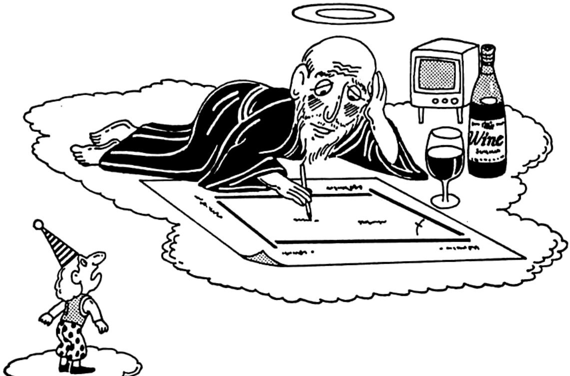
など、ハドロンだけを含む反応や、レプトンだけのものや、ハドロンとレプトンを両方含むものなど種々雑多で、これらを統一的に把握することはなかなかむずかしいように見える。しかし基本粒子クォークとレプトンのレベルに下がって考えれば事はだいぶ簡単になる。例えばπ^-メソンの崩壊(ト)は

$$\pi^- = (d\bar{u}),\ d + \bar{u} \longrightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu$$

と考えられる。中性子やミューオンの崩壊(イ)、(チ)、(リ)も移項して

$$n + \bar{p} \longrightarrow e + \bar{\nu}_e$$

$$\mu + \bar{\nu}_\mu \longrightarrow e + \bar{\nu}_e$$



弱い相互作用は神の手抜き？

$$\mu+\bar{\nu}_\mu \longrightarrow n+\bar{p}$$

とすれば皆同じ型である。しかもn、pは複合粒子udd、uudだから、成分クォークの一つについての反応

$$d+\bar{u} \longrightarrow e+\bar{\nu}_e,\ \mu+\bar{\nu}_\mu$$

に帰せられる。結局、弱い相互作用はレプトンまたはクォークの対の間の転換ということになるのである（K ⟶ 3πなどはもっと複雑だが、強い相互作用も同時に関与していると考えればよい）。これらの転換に何か普遍性があると期待するのは当然であるが、果たしてそうだろうか。

弱い相互作用の秩序性

歴史的には、弱い相互作用の理論は一九三三年のフェルミの理論にはじまる。フェルミのベータ崩壊の理論では中性子が陽子に変わる際に電子と

反ニュートリノの対が発生する（二二三ページ(イ)）が、これは接触型の相互作用、すなわち空間の一点で同時に起こるものと考える。

相互作用を特徴づけるものは、その強さ（結合定数）とタイプ（ベクトル型、スカラー型など）である。強さは崩壊の反応速度（または寿命）を定め、タイプは発生する電子のエネルギー分布とか、崩壊の際に中性子のスピンの向きが変わるかどうかなど、崩壊過程の詳細を左右する。フェルミはベクトル型を仮定したが、これではスピンの向きが変わることはなく、実際事実に反するので、ガモフとテラーがもう一つのタイプを付加した。さらに後になってパリティの非保存が発見され、いわゆるVマイナスA型が確立したのは一九五七年である。ベクトル（V）と擬ベクトル（A）のほぼ等しい混合で、その結合定数はフェルミ定数と呼ばれる。

VマイナスAの理論をあらゆるクォークやレプトンに拡張するのは容易である。先ほど示したように、いつでも基本粒子を対にして（e、ν_e）、（μ、ν_μ）、（u、d）などを作り、勝手な二つの対を組み合わせればよい。ミューオンμの崩壊(チ)は（μ、ν_μ）×(e、ν_e)、中性子nの崩壊(イ)は（u、d)×(e、ν_e)、パイオンπの崩壊(ト)とμの捕獲(リ)は（u、d）×（μ、ν_μ）により生ずる。すべてが同じ結合定数（フェルミ定数）をもつとすれば、これらの寿命には一定の関係があるはずである。パイオンの寿命は計算が困難だが、他の三つの間にはこの普遍性の関係がちゃんと成り立っている。

これで弱い相互作用にも秩序があることが判明したが、まだ一つ困ったことが残っている。それはストレンジ粒子に関するものである。例えばラムダ粒子Λのベータ崩壊(ハ)は(イ)と似ているが、これはクォーク（u、s）の組が関与するものと考えねばならぬ。しかしdクォークはすでにuクォークと組んで（u、d）の対を作っている。しかも（u、s）の結合定数はフェルミ定数の¼くらいにしかならないのである。他のストレンジ粒子Σ（シグマ）、Ξ（グザイ）、Kメソンなどについても同じことが言える。

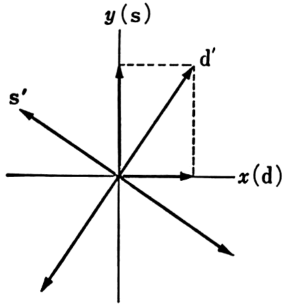
チャーム・クォークがあるはず

この事実を説明するためにカビボ（ローマ大学）が次のような巧妙な考えを導入した。それは（u、d）と（u、s）の別々の組合せをとる代わりに（u、d′）という単一の対をとる。ただしd′とはdとsとの混合（これをカビボ混合という。すなわち電荷が同じで、異なる種（香り）のクォーク（の波）が混ざった状態）だとするのである。そうすれば個々の（u、d）、（u、s）の転換の確率はいずれも標準より小さいが、d′の大部分がdであれば（u、d）の過程はほとんど標準と変わらず、（u、s）だけが目立って小さくなる。

dクォークとsクォークとの混合の割合をいったん決めてしまえば、他のストレンジ粒子の崩壊にも一様にあてはまるはずであるが、実際そうなっていることが確かめられ、カビボの理論は

成功を収めた。しかしなぜd′などという変な混合が弱い相互作用に現れるのだろうか。もともと三種の香り（u、d、s）で$SU(3)$の対称性をなしていたのに、弱い相互作用については二個組を作らねばならぬことに無理があるのではなかろうか。

右の疑問を投げかけたのは牧二郎、大貫義郎、原康夫、ビョーケンとグラショウ、ゲルマンなどであった。弱い相互作用の立場から出発すれば、（u、d′）の組に対抗して（c、s′）という組があって然るべきである。ここでd′がdクォークとsクォークの混合ならば、s′はそれに「垂直」な混合で、主にsクォークから成るもの、cは新しい第四のクォークで、uクォークと同じく電荷⅔をもつが、質量がずっと重いので（その当時は）まだ発見されていないと仮定する。もちろんこれは現在のチャーム・クォークにほかならない。dクォーク、sクォークとd′、s′との関係を理解するには光の偏り（偏光）と比べるのがよろしい。



18.1　偏光とd，s，d′，s′クォーク

図18・1に示すように直線偏光はいつでも二つの直角なxとyの成分に分解できる。この二つの成分をdクォークとsクォークになぞらえれば、d′は図の中の一つの偏光に相当し、s′はそれに垂直な偏光に相当する。逆にdクォークとsクォークをd′とs′の方向に分解することもできる。

ただ座標軸のえらび方がちがうにすぎない。

弱い相互作用の枠が傾いているとはじめに言ったのはまさにこのことである。強い相互作用では、異なるクォークの種（香り）はd、sの枠に従って区別されるのに対し、弱い相互作用の方はd′、s′の枠に従っている。

チャーム・クォークcの存在を予想したのは牧‐大貫の理論だけではないが、素粒子の数はいくらあってもよいという坂田博士のはっきりした指導原理に基づいている点で特筆されるべきであろう。その後グラショウ、イリオポロス、マイヤニ（略してGIM）の三人によってチャーム・クォークはいわゆる中性カレントの問題を解くためにも必要であることが指摘され、ますます必然性が強く感じられるようになった。

くわしくは、後でもう一度説明するが、普通のベータ崩壊では、$u \longleftrightarrow d'$、$e \longleftrightarrow \nu$などのように必ず電荷が交換されるのに対し、中性カレントとは、例えば

$$d + e \longrightarrow d + e$$

のごとく電荷が交換されない過程で、弱い相互作用のゲージ理論から要求されるものである。ただし右の場合はdクォークの崩壊としては現れないから観測が困難だが、$s \longleftrightarrow d$すなわち

$$\Lambda \longrightarrow n + e + \bar{e}$$

は、カビボの理論によれば$d' \longleftrightarrow d'$の中に含まれるから、普通の$\Lambda \longrightarrow p + e + \nu$と同じ程度

に起こってもよいはずである。しかしこんな過程は実際に見られない。それはs↔dがd′↔d′の他にs′↔s′の中にも含まれていて、両方が打ち消し合うからだとするのが右にあげたGIMの理論である。

カビボにはじまる、傾いた枠の考えは、小林誠、益川敏英の両氏によってさらに拡張される。これまでは（u、d）、（c、s）の二つのクォーク組の間だけで、枠の傾きはdクォークとsクォークの混合として現れた。もっともdクォークとsクォークの代わりにuクォークとcクォークを混ぜても結果は同じで、便宜上の問題にすぎない。混じり方は一つのパラメータで表せる。しかしクォークの組が三つにふえると事情は変わってくる。

第三の組を（t、b）としよう。今度はdクォーク、sクォーク、bクォークがお互いに混合し合って、d′、s′、b′になりうる。三つの混合は二つの混合よりずっと自由度が大きく、三つのパラメータが必要で、しかもその一つは複素数でありうる。そのためCPも保存されなくなる可能性のあることを、小林、益川が指摘したのである。つまり実際にCPがわずかに破れているのはクォーク組が少なくとも三つあるからではないか、と。

これらの考察がみな実際のチャーム、ボトム、トップの発見に先行しているのは驚くべきことである。三つのクォークd、s、bの混じり方とCPの破れ具合は三つのパラメータを含む三次の行列で表せる（しかしもしも三つ以上の世代があったらパラメータの数はうんとふえる）。現

在物理学者の努力はこれらのパラメータを決めてカビボ - 小林 - 益川の行列の理論の正当性を確認することに注がれているのである。

これまではクォークの間の混合を考えてきたが、レプトンについても同じことが言えるのではないか？　すなわち電子e、ミューμ、タウτにはそれぞれ固有のニュートリノν_e、ν_μ、ν_τと組をなしていて、組の中の変換しかしないのではなく、実は少し混合が起こっているのではないだろうか？　もし混合がなければ、例えばパイπ^-の二種類の崩壊

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \nu_\mu,\quad \pi^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu$$

の場合のニュートリノはそれぞれ違ったニュートリノであるから、高エネルギーのパイが崩壊してできたニュートリノのビームがまた陽子と反応すれば、それぞれの場合に必ず

$$\nu_\mu + p \longrightarrow \mu^+ + n,\quad \nu_e + p \longrightarrow e^+ + n$$

となるはずである。これは興味ある問題で現在盛んに追究されているが、ニュートリノのことは後でもっとくわしくとり上げることにする。

なぜ弱い相互作用の枠が他に対して傾いているのかは、未解決の謎である。しかし、もし傾きがなく、神の設計が完全だったらどうだろうと想像してみるのもおもしろい。クォーク、レプトンの各世代は質量以外はみな同じ性質をもち、それらが混じることがなければ世代は一つの保存量となる。その場合は例えば第二世代の中でc$\longrightarrow$sの変換が生じても、sがさらに第一世代の

uに変わることはできない。だからラムダ粒子ΛやKメソンは安定、一般に原子核は陽子、中性子、Λなどから構成され、世界はずっとちがったものになるだろう。生物が存在できないかもしれない。傾いた枠の設計も実は理由があったのではないだろうか。

19 ワインバーグ‐サラムの電弱統一理論



湯川メソンを超えて

電磁相互作用がマックスウェル理論から出発する量子電磁力学（QED）で記述され、強い相互作用が色のゲージ場に基づくQCDで記述されるとすれば、弱い相互作用を記述するゲージ理論は何か。これに答えるのがワインバーグ‐サラム（WS）の理論である。それのみならず、WSの理論は電磁相互作用と弱い相互作用を同時に統一して記述するもので、いわゆる統一場の理論という長い間の物理学者の夢を、初めて夢でなくしたものである。統一理論とは、異なった相互作用を記述する異なった理論が互いに独立無関係なものではなく、もっと大きな理論形式の中の一部分として含むことを言う。それではQCDとWSとをさらに統一して素粒子の三つの相互作用を全部一つの理論にまとめることはできるだろうか。このような統一は大統一と言われて、その候補者はいろいろ知られているが、残念ながらまだどれが真実かはわかっていない。しかし

QCDとWSとで、現在知られている素粒子のふるまいが正しく記述できることがほぼ確実のようである。それでQCDプラスWSに「素粒子の標準模型」という名前がついている。しかしこの章ではまずWSの理論の説明から始めよう。

前の章ではフェルミの理論がいかにしてあらゆる基本粒子にうまく拡張されたかを説明したが、この接触型の相互作用（二二六ページ）は、すべての相互作用が何らかの場によって媒介されるという湯川的思考からすれば不自然であろう。実際湯川博士がメソンの仮説を立てたとき、ベータ崩壊もこれで同時に説明しようとねらわれた。すなわち崩壊は、

$$\text{I}\quad n \longrightarrow p + Y^-$$

$$\text{II}\quad Y^- \longrightarrow e + \bar{\nu}$$

の二段階を経るもので、核力が核子の間でメソンYを交換して起こるように、ベータ崩壊は核子とレプトンの間でメソンYを交換して起こると考えるのである。しかしこの考えはすぐ困難にぶつかってしまう。ベータ崩壊の普遍性、すなわち中性子nとミューオンμの崩壊の結合定数が同じだという事実（二二六ページ）に抵触するのである。

湯川の二段階仮説では、最初の段階（I）は核力の場合と共通で強い結合定数をもつから、第二の段階（II）が弱いと考えねばならぬ。ところがレプトンであるμの崩壊の場合は強い力がないからどちらの段階も弱いとせねばならず、普遍性を説明できない。したがって弱い相互作用を

媒介する場があるとすれば、それはメソンとは別のものでレプトンとハドロン（またはクォーク）の区別なく、どちらにも同じように弱く結合する代物であるという結論に達するのである。

Wボソン

この新しい仮説的な場の量子はWボソンと呼ばれる（Wはweakの意味）。核力の場合の湯川的論理を弱い相互作用に適用したと思えばよい。

そこで中性子とミューオンのベータ崩壊過程をもう一度図式にしてみよう。

$$\mathrm{n} \longrightarrow \mathrm{p} + \mathrm{W}^- \quad (\text{または}\ \mathrm{d} \longrightarrow \mathrm{u} + \mathrm{W}^-)$$

$$\mu \longrightarrow \nu_\mu + \mathrm{W}^-$$

$$\mathrm{W}^- \longrightarrow \mathrm{e} + \bar{\nu}_e$$

移項した式も考えれば、Wボソン（とその反粒子）は電荷±1をもつボソンだということになる。

グラショウ　S. L. Glashow（一九三二〜）
サラム　A. Salam（一九二六〜一九九六）
ワインバーグ　S. Weinberg（一九三三〜）

電磁力と弱い力の統一理論に貢献したことにより一九七九年ノーベル賞共同受賞。グラショウはハーバード大学教授。ワインバーグはテキサス大学教授。



グラショウ

グラショウはチャーム・クォークの存在を予想したGIM（グラショウ－イリオポロス－マイヤニ）理論や、大統一理論のさきがけとなったジョージャイ－グラショウの$SU(5)$の理論などによってもよく知られている。

ワインバーグの貢献は素粒子論から宇宙

Wボソンのスピンや質量は？　まずスピンの方は簡単で、ベータ崩壊がVマイナスA型であるためにはWボソンはスピン１（すなわちベクトル型）をもち、レプトンやクォークの左巻きの成分（反粒子については右巻き）に結合するとすればよい。

逆に言えば、Wボソンのスピンが１で、あらゆる粒子に同じ強さで結合するからVマイナスAの普遍的相互作用が生まれると主張できる。これは光子のスピンが１で、電荷の値が普遍的であるのに匹敵し、弱い力もゲージ場であることを示唆するのだが、他の点ではWボソンはゲージ場の性質をもっていない。

電磁力は到達距離の長い力で、その量子（光子）の質量が０であるのに反し、弱い力の到達距離は極端に短く、フェルミ理論では０と仮定された。これはWボソンの質量を無限大とみなすことに等しい。

論にわたって極めて広く、この両分野の融合をはかった功績は大きい。『宇宙はじめの三分間』などの著書によってもよく知られている。



ワインバーグ

サラムはパキスタン人だが、長年ロンドンのインペリアルカレッジの教授を務めるかたわら、イタリアのトリエステに国際理論物理センターを設立して途上国研究者の援助に骨を折ってきた。



サラム

研究活動においても極めて精力的で、最近はスーパーシンメトリー（超対

しかしもし到達距離が有限ならば、フェルミ定数はWボソンの結合定数gと到達距離の積の二乗（あるいはgと質量Mの逆数の積の二乗）として表される。だからgとMを別々にフェルミ定数から決めることはできない。

右の関係は、相互作用に関与する粒子のド・ブロイ波長が力の到達距離よりずっと大きい、低エネルギーの現象にのみあてはまるもので、ベータ崩壊はこの場合に属する。しかし弱い相互作用を高エネルギーでやらせることも可能である。

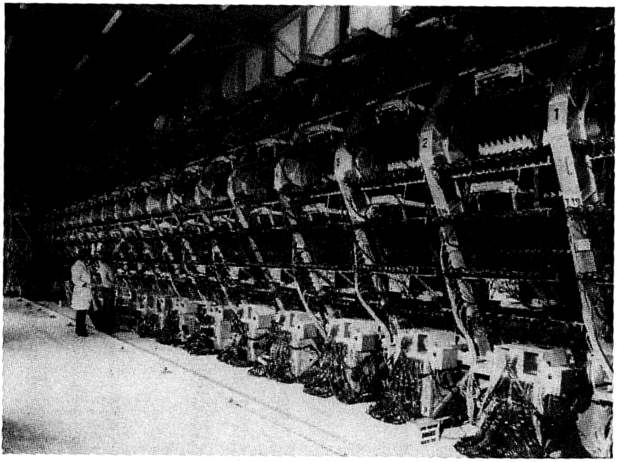
その適当な例はニュートリノ反応

$$\nu_\mu + \mathrm{n} \longrightarrow \mu + \mathrm{p} + \cdots\cdots$$

で、高エネルギーのニュートリノビームを的（まと）にあてて、出てくるミューオンなどをつかまえる。これは電子と陽子の電磁的散乱に似ており、今の場合は光子の代わりにWボソンが交換されるわけである。

フェルミ理論によれば右の反応の断面積はエネルギーに比例してどんどん大きくなるが、もしWボソンの質量が有限（すなわち弱い力の到達距離が0でない）ならば反応のエネルギーがWの質量より大きくなったところで頭打ちになるはずである。だから加速器のエネルギーが十分に高

称）そのほか、場の理論の尖端において活躍した。



19.1　CERN（セルン）でのニュートリノを使う実験装置
(PHYSICS TODAY/oct.1978)

くなかった時代にはフェルミの理論で間に合った。またもし湯川の考えが正しかったとすれば、パイオンの質量くらいのエネルギーですでに頭打ちが起こったはずだが、そんなことはなかった。最近のFERMILAB（フェルミラブ）やLEP（レップ）での実験によって初めてWを実際に作ったり、反応断面積の頭打ちの傾向をとらえることができるようになったのである。

余談ながら右のニュートリノ実験は生やさしいものではない。断面積がエネルギーとともに大きくなるのは大加速器での実験には好都合だが、それでも強い相互作用に比べて非常に小さい。

ニュートリノビームを作るには、まず陽子ビームを的にあててパイオンを発生させる。前方向に出たパイまたはKメソンの崩壊によって生

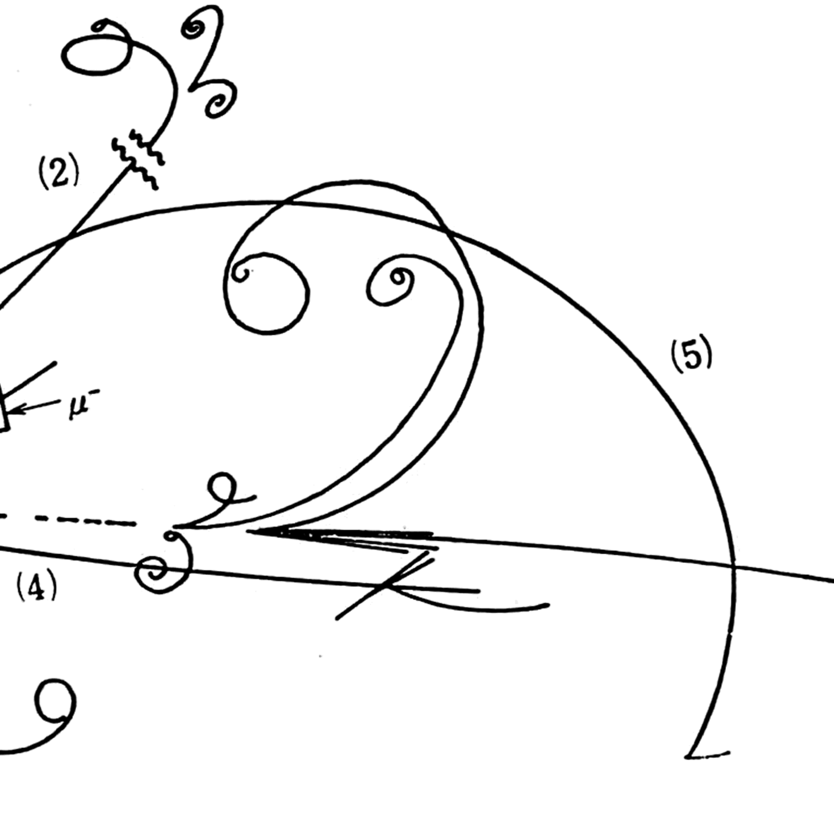
じるニュートリノを泡箱などの中に通すのだが、他の邪魔物の粒子を除かねばならぬし、パイオンの寿命もエネルギーに比例して伸び、なかなか崩壊してくれない。FERMILAB（フェルミラブ）の施設では、ニュートリノビームは何百メートルも土手の中のパイプを走って測定器に到達するのである。

電磁力と弱い力の統一へ

さてWボソンの存在がまだ実験にかからなかったとしても、理論的にその質量を予言できないだろうか。先ほど指摘したように、弱い力の結合定数がわかっていればこれは可能である。そこでこの結合定数が電磁場の結合定数（すなわち単位電荷）と同じものとしたら？

右のような考えが人の頭に浮かぶのは自然であろう。電磁力と弱い力の統一理論はまさにこんな単純な動機から出発するが、もちろんそれ以外にもいろいろ理由をくっつけることができる。例えば弱い力も電磁力も、クォークとレプトンの両方に普遍的に作用する。すなわち強い力がクォークの色にのみ作用するのに対し、弱い力はクォークとレプトンの香りの量子数に働きかけることが共通している。弱い力が電磁力と比べて非常に弱く、性質が全くちがうように見えるのは光子とWボソンとの質量のちがいによるものではなかろうか。

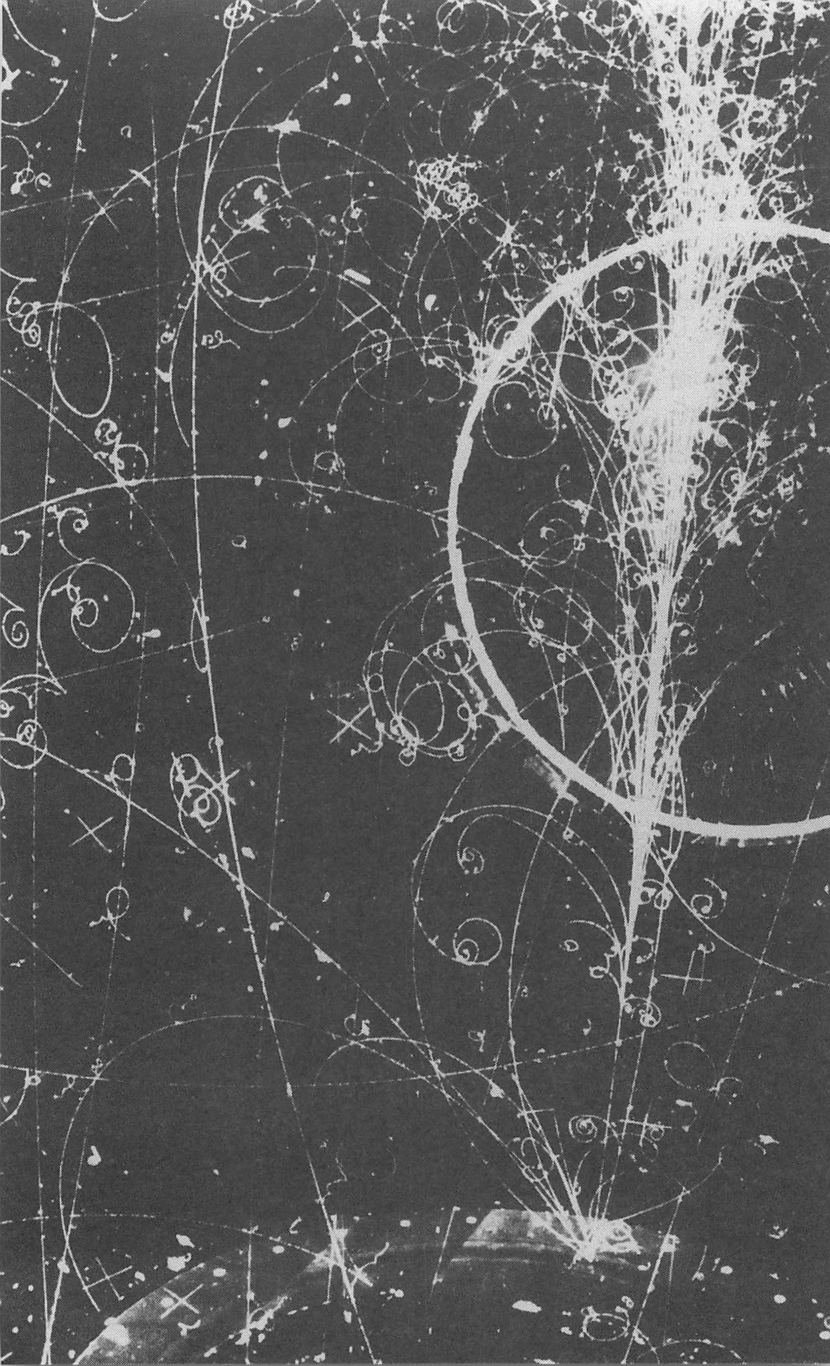
弱い力の結合定数が電荷と同じだと仮定すれば、Wボソンの質量は四〇 GeV と計算される。



→ K

$\nu_e + \mathrm{Ne} \rightarrow e^- + e^+ + K_s^0 + \pi^+ + \pi^- +$ 中性粒子

(1) (2) (3) (4) (5)



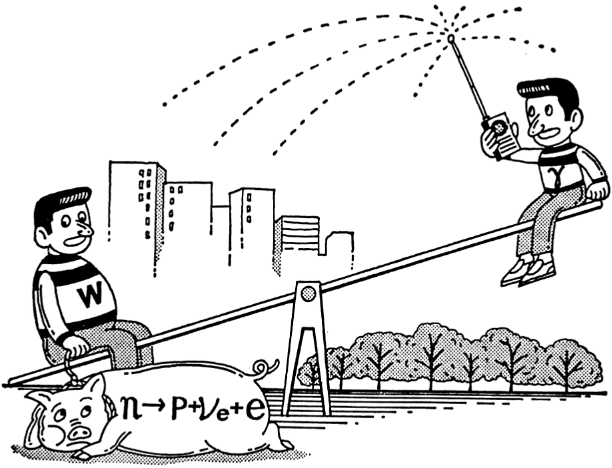
ハドロンの質量が一 GeV の程度であることを思えば、Wボソンは非常に重い粒子だと言わねばならない。LEP(レップ)やFERMILAB(フェルミラブ)の加速器ができるまで見つかっていなかったのも無理もないわけである。しかし弱い力はパリティを破ったりするから、簡単に電磁力と同じ結合定数だけで記述できないかもしれない。

電弱統一理論の試みは、右の線にそってグラショウ、サラム、その他の人たちによって早くから行われていたが、まだ本格的なゲージ場の理論とは言えなかった。論理的に完備した理論がワインバーグとサラムにより独立に提出されたのは一九六七年で、これが今日ワインバーグ－サラム（WS）の理論と呼ばれているものである。

超伝導現象との対比

対称性の破れの例として先に超伝導現象をあげておいたが、WS理論はいろいろな意味でこれをモデルにしている。以下にこの類似点をたどって説明を試みよう。

絶縁体は電場や磁場に対して「透明」で、場を内部に侵入させる。これに対し普通の伝導体は磁場には透明だが電場を遮蔽(しゃへい)してしまう。超伝導体においてはさらに磁場も遮蔽される（マイスナー効果）。しかし遮蔽といっても媒質に入ったとたんに場が0になるのではなく、表面の薄い層にある程度侵入するのである。



Wボソンと光子のちがいは質量のちがい

透明と遮蔽の性質のちがいはクーロン力と湯川型の力のちがいと同じで、媒質の種類によって場の到達距離が無限大であったり有限であったりすることを意味する。場の侵入する層の厚さがすなわちその媒質における到達距離である。だからここに湯川の論理を適用すれば、到達距離の逆数に比例する質量をもった「粒子」が存在するはずだ。

すなわち透明な媒質の中では光子は質量のない粒子であるが、超伝導体の中では一定の質量（静止エネルギー）をもつ粒子としてふるまうだろう。この粒子はプラズモンと呼ばれている。もしわれわれが超伝導体の中に住んでいれば、プラズモンの交換によって生じる電磁力は湯川型の力として現れる。

WS理論は電磁力と弱い力とを統一しようとす

るものだから実際のお膳立てはもっと複雑である。$W^{\pm}$ボソンと光子のほかにZ^0という中性ボソンが導入されていて、後者は弱い中性過程、すなわち$\nu \longrightarrow \nu$, $e \longrightarrow e$など、電荷の変化しない過程を引き起こす。例えば

$$\nu + p \longrightarrow \nu + p, \quad \bar{\nu} + p \longrightarrow \bar{\nu} + p$$

などである。このような中性過程が実際に存在するかどうかは、それ自体非常に興味ある問題なので、ニュートリノビームを使っての実験がヨーロッパとアメリカで執拗に続けられた結果、その存在が確立されるにいたった。

WS理論にもどろう。これはしばしば$SU(2) \times U(1)$のゲージ理論とも言われるごとく、一般に異なる結合定数をもつ非アーベル的な$SU(2)$とアーベル的な$U(1)$のゲージ場の組合せで構成されているが、その意味を知るにはレプトンやクォークにどう作用するかを見ればよい。(u、d)や(ν、e)などの二つ組は「弱い」アイソスピン½をもつとみなされ、それらの成分の間の変換が「弱い」$SU(2)$である。これに対し、$U(1)$の方はクォークとレプトンの区別をする量子数と考えられる。$SU(2)$のゲージ場は「弱い」アイソスピンが1で三つの成分をもち、$U(1)$のゲージ場は「弱い」アイソスピンが0である。強いアイソスピンになぞらえれば、これらのゲージ場はパイオン($\pi^{\pm}$、π^0)とη^0メソンのようなものである。$\pi^{\pm}$メソンが$W^{\pm}$ボソンに、π^0メソンとη^0メソンの適当な混合がZ^0とγに対応する(ここで混合とは、さきにカビボが言

ったsクォークとdクォークの混合（18章二二七ページ）と同様な意味をもつ）。

四つのゲージ場の成分を電磁場γと弱い場$W^{\pm}$、Z^0に分け、後者に質量を与えるためには、この世界はかなり複雑な「超伝導体」と考えねばならない。その数学的からくりは省略するが、WS理論ではヒッグズ（Higgs）の場と呼ばれるものが「超伝導体」を代表する（この方法は実際の超伝導の場合に旧ソ連の有名な物理学者ランダウとギンズブルグが導入したものと同じ性質のものである）。ヒッグズ場と弱い場は水と油のような仲で、混合しない。これがすなわちマイスナー効果に相当する。

WS理論が出たのは一九六七年である。しかしそのころは中性過程の存在がまだ実証されていなかったし、この理論がくりこみ理論の枠に入るかどうかも疑問だった。もしくりこみが可能でなければ弱い相互作用の基本的理論とは言えない。

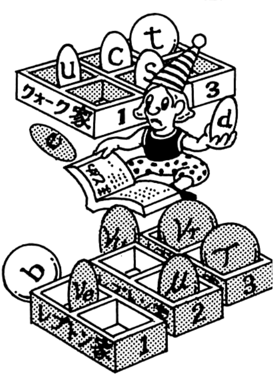
これらの点を別として、WS理論で最も重要なのは、もちろんWとZ^0ボソンの存在のみならず、その質量までも予言したことで、これは強い相互作用における湯川メソンの予言に匹敵すると言えるであろう。

一九七〇年代に入って中性過程の存在は、ヨーロッパ連合原子核研究機関CERN（セルン）とフェルミ研究所における実験によって確認され、またオランダのトホフトによりWS理論のくりこみ可能性も証明された。しかしWとZボソンを実際に作り出すという決定的な検証のためにはまだ加速

器のエネルギーが足りなかった。一九八〇年代に入ってようやくCERN（セルン）の電子－陽電子型大加速器が完成し、WとZボソンの存在は一九八三年にWS理論どおりの質量をもった粒子としてめでたく確認された。これは世界各国から集まった何百人という物理学者や技術者の協力による大規模な仕事であるが、この実験を可能ならしめた主要企画者としてイタリアのルビアとオランダのファン・デル・メールの功績は大きく、その翌年彼らにノーベル賞が与えられた。

WとZボソンについては次の章でもっとくわしく説明しよう。

20 素粒子の標準模型Ｉ
——素粒子物理の現状のまとめ



これまでの章では素粒子にどんな種類があり、どのような性質をもっているか、またそれらを追究するためにどのような実験をするか、その結果を理解し、記述するためにどのような法則や理論が見出されてきたかを、ほぼ歴史的に順を追って説明してきた。半世紀にわたる物理学者のこのような努力の総合的結果として、現在知られている諸現象を記述する完全に近い理論ができている。素粒子の標準模型と呼ばれているものがそれである。そこでこの章ではすでに紹介した事項の要点に多少追加敷衍を加えてまとめ、素粒子に関する知識の総合とも言うべき標準模型とは何かを説明する。重複を免れないが、ここまで読んできた読者には全体の復習になるであろうし、すでに素粒子物理の内容をある程度知っている人たちには、現在に達するまでの詳細を後まわしにして、まずできあがった標準模型から出発するのも一つの方法であろう。

素粒子物理学の法則は相対論的量子場の理論という枠の中で記述されるものであるが、枠が初

めから完成しているわけではない。実在の場や粒子の種類とその相互作用を探る一方、理論体系を発展させることが必要である。物理学者の過去何十年にわたる努力は、この二つの問題に費やされ、この二つの努力が助け合って進歩が得られたといってよいだろう。進歩はまず実験事実の定性的な特徴をとらえて一応の解釈を与えることから始まる。アイソスピンやストレンジネスの近似的な法則を見出すことや、クォークモデルを導入することなどがその代表的な例である。しかしモデルはまだ本当の物理法則とは言えない。本当の物理法則は数学的に厳密な普遍理論であって、どんな個々の現象に対しても定量的に正しい答を与えることができるようなものである。しかしそのような記述法は必ずしも直接にモデルだけからは生まれてこない。もっと一般的な考察に従って創り出したいろいろな数学的あるいは物理的なアイデアが総合されて、最後にモデルに結びつき、実験事実と対照してその正しさが検証される、というのが今までの歴史的過程であった。

現在「素粒子の標準模型」と呼ばれているものは、右のような過程を経て一九七〇年代までに整っていたいろいろな実験事実と理論体系を総合した結果生まれたもので、さらにその後現在に至るまでの綿密な定量的検証によって、その正しさが裏付けられてきた。しかしまだ検証されていない部分もあり、理論的に不満足なところも残っているので、一応「模型」と呼ばれていて、まだ最終的な「理論」ではないとみなされている。

そこで、標準理論に含まれる「素粒子」のリストから始めよう。まず素粒子は①物質粒子、②力の場の量子、③補助的な場の量子の三種類に分けられる。

物質粒子は基本粒子または基本フェルミオンと呼ばれ、その名のごとく普通の意味での物質の構成要素で、そのスピンは½、フェルミ‐ディラックの統計に従う。

力の場の量子は三種類の力——すなわち電磁力、強い力、弱い力——を媒介するゲージ場の量子で、そのスピンは1、ボース‐アインシュタインの統計に従う。

補助場はヒッグズ場と呼ばれ、弱い力の量子と物質粒子に質量を与えるという理論的目的のために仮定された。スピンは0、ボース‐アインシュタイン統計に従う。しかしヒッグズ場の量子（ヒッグズ・ボソン）はまだ見つかっていない。

①　基本粒子

むかしは電子、核子（陽子、中性子）、湯川メソンなどが素粒子だとされていた。しかし現在では電子以外は複合体で、真の基本粒子はクォークとレプトンだと考えられている。基本粒子の相互作用は三つの力の場によるから、それぞれのもつ三種類の量子数（電荷）によって粒子を区別することができる。

電磁力の電荷はもちろん普通の意味での電荷だが、他の力の「電荷」と区別するためここでは特に「電磁的電荷」と呼んでおく。強い力の「電荷」は「色」と呼ばれ、赤、緑、青の三種類が

あるが、もちろんこれらの名前は単なる比喩にすぎない。「電荷」の大きさはゲージ場による相互作用の大きさを決めるので結合定数とも呼ばれる。これを g とすると $g^2/\hbar c$ は次元のない数で、電子の電磁的電荷 e の場合には $e^2/\hbar c = 1/137$ がいわゆる微細構造定数であった（15章）。

物質粒子には色をもつものともたないものがある。色をもつ、すなわち強い力をもった粒子はクォーク、色をもたないものはレプトンと呼ばれる。例えば電子はレプトン族の仲間であるが、核子やメソンはクォークの複合体である。

さらに色のあるなしにかかわらず、他の二つの力の「電荷」などのちがいによっていろいろな種類があるので、それらを区別するレッテルが必要だ。このレッテルは「香り」と呼ばれる。

電磁力と弱い力に関しては、ワインバーグ－サラムの電弱統一理論によってこれらをひとまとめにして取り扱える。弱い力はすべての粒子に作用し、ベータ崩壊のように二つの粒子の間の転換を起こすので、いつも電磁的電荷のちがった二種の粒子が対となって存在する。この対は陽子と中性子の対がアイソスピンの対をなしていたのと同じ関係であるが、レプトン族の電子とニュートリノも対をなし、弱い力に関するものだから「弱いアイソスピン」の対と呼ばれる。

右の結果を一応まとめれば、三種の色をもつものはクォーク、もたないものはレプトンで、それぞれは弱い力に関しては電磁的電荷の違う二個の対をなして存在するというわけである。したがって基本粒子の数は（3＋1）×2＝8 になる（もしそれらの反粒子を別に勘定すれば一六

で、理論的にはさらに左巻きと右巻きの成分を区別することが必要である）。

電荷とスピン以外に粒子を特徴づけるものはその質量だ。しかし前の二つが必ず最小単位の整数倍に量子化されているのに反し、質量には規則性が見られない。香りによってみなちがい、それらは実験的に定められるだけである。ただ理論的に言えるのは、色には全くよらないことであるが、クォークは単独では存在しないから、直接実験にはかからない。

しかし不思議なことに、実は粒子の数はこれだけではなく、量子数はすべて同じで質量だけがちがうものも何回も現れる。それでこの一六個の組は普通一「家族」または一「世代」と呼ばれ、この世界には三家族または三世代、総計二四の基本粒子（反粒子も数えれば四八）が存在することが知られている（ここでは「世代」という名前を使うことにする）。つまり香りで言えばクォークもレプトンも弱いアイソスピン 1対×3世代＝6種 あることになる。粒子の質量は世代の順にだんだん大きくなるが、やはりはっきりした規則性がない。特に第三世代のトップ（t）クォークは特別重く、一九九四年にやっとFERMILAB（フェルミラブ）で存在が確認された（t、$\bar{t}$の対が作られ、それぞれb、$\bar{b}$にベータ崩壊するのを観測する）。

世代番号は新しい量子と考えてもよさそうだが、それに付随するゲージ場の存在は知られていない。世代番号は保存量でもないし、世代の総数を定める理論的根拠もない。言い換えれば世代の存在理由は不明である。

	第一世代		第二世代		第三世代	
クォーク	u	0.3GeV (0.01GeV)*	c	1.5GeV	t	174GeV
	d	0.3GeV (0.005GeV)*	s	0.45GeV	b	5GeV
レプトン	e	0.0005GeV	μ	0.1GeV	τ	1.7GeV
	ν_e	?	ν_μ	?	ν_τ	?

＊かっこの中はカレント質量（p.270〜271ページ参照）

20.1　基本粒子とその質量（近似値）

さて、これらの基本粒子とわれわれになじみのむかしの素粒子との関係はどうか。

図20・1を見ていただきたい。いわゆる普通の物質はすべて第一世代の基本粒子からできている。

電子はニュートリノと組んで対をなし、レプトン族の第一世代を作る。これに対応する三色クォークの対はu、d（上：up、下：down の意味）だが、色のゲージ場の特殊な性質によって、クォークは単独で遊離して存在しえず、必ず三つの色が集まって白色の複合体を作る。電磁気の場合にはプラスの陽子とマイナスの電子が結合して電磁的に中性の水素原子になったように、三つの色が集まって中性（すなわち白色）の「ハドロン」になる。これが13、16章で述べたいわゆる「クォークの閉じこめ」の現象である。

実在のハドロンはバリオンとメソンで、バリオンは色のちがった三個のクォークの複合体、メソンは同じ色のクォーク

基本場の量子

γ	0
Z^0	91GeV
W^+, W^-	80GeV

補助場（ヒッグズ場）の量子

H^0	?

20.2　基本場と補助場の量子の電磁的電荷

とその反クォークの複合体がさらに三色について平均されたようなものだと考えればよい。しかし同じ色でも香り、つまり弱いアイソスピンと世代とで六種類あるからそれらの組合せによって多くの複合体を作りうる。原子核の構成要素である核子、すなわち陽子と中性子はバリオンの例で、第一世代のクォークだけを含み、それぞれ化学記号では（色の組合せを無視して香りだけを表せば）uud、dduとなるものである。反バリオンは反クォークu、dから同じように作られる。メソンについては、uu、ud、du、ddの組合せができる。

右の分類では粒子の最も観測しやすい性質、すなわちその電磁的電荷に触れていなかったが、これは図20・2に示しておいた。弱い相互作用からの要請として一般に電磁的電荷はアイソスピンの違いによって1だけ異なる。レプトン族では電子とニュートリノの電荷が−1と0であることは経験的事実として、クォークの場合はuが⅔、dが−⅓という異常な値をもっている。これはバリオンが三つのクォークを含むことから当然要求されることだが、単

独クォークが存在しないからその電荷は直接観測にはかからない。しかし3章で述べたように、電磁的電荷が分数である性質を利用して単独クォークを探す試みがあったし、今後もありうるだろう。

そこで前のバリオンとメソンにもどってその電荷を調べてみよう。反粒子は必ず電荷が粒子の電荷の逆であることに注意して構成粒子の電荷を足し合わせれば、陽子と中性子の電荷がそれぞれ1、0であることがわかる。同様にしてメソンの場合は上の四つの組合せはそれぞれ0、1、−1、0になる。例えば湯川のパイオン（π）は−1、0、+1の三種類あったが、電荷0のパイオン（π^0）は上の二つの0の状態の混合に相当するものである。

② 力の場の量子

標準模型は $SU(3)\times SU(2)\times U(1)$ のゲージ理論とも言われ、三種類の力、強、電、弱は、三種類のゲージ場によって媒介される。強い力のゲージ場の電荷は色、その量子はグルーオン、その力学がQCDである。色に三種類あることから$SU(3)$と呼ばれる。一般にn個あれば$SU(n)$、nが1のときは特に$U(1)$という。また$n=1$はアーベル的、1以上は非アーベル的と呼ばれる。$SU(2)$と$U(1)$はいっしょになって電と弱の力をとりもつ。

色の量子数をもっとくわしく説明しよう。一般に$U(1)$は一個、$SU(n)$は量子数は $n-1$

個の量子数（電荷）をもつ。またゲージ場の成分の数は n^2-1 個ある。色の場合は $n=3$ だから、量子数は二種類だ。すなわち色は二つの量子数の組合せで指定される。正三角形を二次元平面に描くと、三つの頂点がクォークの三つの色に相当し、その x 座標と y 座標が量子数である。10章に出てきたハドロンの $SU(3)$ の対称性は色の対称性とは全く別のもので、u、d、sの三つの香りの間の近似的対称性であったが、同じ概念が適用できて（強い）アイソスピンとストレンジネス（またはハイパーチャージ）がその二つの量子数に相当する。10章の図10・2、図10・3はちょうどこの二次元平面に相当する。またグルーオンの八つの成分は図10・2のバリオンの八個組に相当するものである。

非アーベル的ゲージ場の特徴は、①場自体が電荷をもち、場の源となること、②漸近的自由性という性質をもつこと、である。一般に結合定数の見かけの大きさは現象のエネルギーによって変わるもので、漸近的自由性とはエネルギーとともに結合定数が小さくなることを意味する。言い換えればエネルギー無限大の極限で結合定数が0、すなわち力がなくなることを意味する（16章）。この変化は対数的で非常に緩やかだから、エネルギーが一〇桁上がっても結合定数の変化は何十パーセントという程度にすぎない。

しかし一方、エネルギーをどんどん小さくしていくと結合定数が大きくなってくる。長さに直せば、クォークの間の引力が距離の逆二乗に比例するクーロン型でも、距離が大きくなれば結合

定数が大きくなって、事実上は力が強くなり、お互いから離れられなくなる。これがクォークの閉じこめ、すなわち単独クォークが存在しないことの理論的説明だと考えられている。

次に電、弱のゲージ場のほうはワインバーグ‐サラム（WS）の$SU(2_L)\times U(1)$統一理論で記述される。その名の示すごとく、$SU(2)$と$U(1)$の二種類のゲージ場から成り立っていて、弱いアイソスピン（のz成分）$I_z=\pm 1/2$がSU(2)の「電荷」である。Lという添字は左巻きのフェルミオン（反粒子では右巻き）だけがもっている、すなわち弱い力が左右対称でなくパリティを保存しないことを意味している。

$U(1)$の「電荷」はハイパーチャージ（超電荷）Yと呼ばれる。これが電磁力の「電荷」に相当すれば事は簡単だが、電磁的電荷Qは弱い「電荷」とハイパーチャージの和

$$Q = I_z + \frac{Y}{2}$$

で、電磁力は$U(1)$だけでは記述できない。その理由は電磁力が左右対称だから、ハイパーチャージによって弱いアイソスピンI_zの左右のちがいを取り消すとともに、クォークとレプトンの電磁的電荷の違いもこれに押しつけるからである。このハイパーチャージは7章（九三ページ）の中野‐西島‐ゲルマンの法則に出てきたものと同じではないが、その役割は似ている。$SU(2)$と$U(1)$の結合定数の比はほぼ二対一で、その点では弱い力が電磁力に比べてずっと弱いわけではない。つまり$SU(2)$と$U(1)$とは切り離せない。WS理論が電弱統一理論たるゆえんであ

る。

もう少しくわしく言えば、$SU(2)$と$U(1)$の結合定数をそれぞれg_2、g_1とすると、電磁的電荷eとの関係は

$$\frac{1}{e^2}=\left(\frac{1}{g_1}\right)^2+\left(\frac{1}{g_2}\right)^2$$

で表される。またg_1とg_2との相対的大きさを示す量として

$$\tan(\theta_W)=\frac{g_1}{g_2}$$

で定義されるθ_Wをワインバーグ角と言い、あとで述べる弱い力の量子WとZボソンの質量の比から定められる。

しかし弱い力の性質は本質的に電磁力とちがっていて、後者がゲージ場の典型的性質を備えたクーロン型であるのに対し、前者は湯川型で到達距離が非常に短い。したがって電磁場の量子すなわち光子の質量は0だが、弱い力の量子は0でなく一〇〇GeVのオーダーという大きな値をもっている。陽子の質量が一GeVのオーダーだから到達距離はそのコンプトン波長の一〇〇分の一しかない。弱い力が弱い理由は結合定数が小さいからではなく到達距離が短いからである。

ではは弱い力のゲージ場がなぜゲージ場らしくないのか。これを解決するのがWSの理論の本質

的なポイントで、17章で説明した対称性の自発的破れの概念に基づいている。17章では超伝導体のなかで電磁場はクーロン型から湯川型に変わり、光子はプラズモンに変わることを述べた。その理由は、超伝導体にはクーパー対が満ちていて、電磁場が入り込むためには余分のエネルギー（＝質量）がいるからである。またその中の個々の電子も一種の質量をもつ。一般にこのような性質の媒質を一種の場だと考え、ヒッグズ場と呼ぶ。ある条件のもとでは、ヒッグズ場が自発的に発生して空間を占領し、そこが超伝導体になるわけだ。これをヒッグズ機構という。

WSの理論ではヒッグズ場を仮定し、ヒッグズ機構により$SU(2)$ゲージ場の三成分と$U(1)$のゲージ場の一成分の合わせて四個の成分のうち、三つが質量をもつようにお膳立てをする。あとの一成分はヒッグズ機構から免れて$U(1)$の対称性をもったゲージ場として残る、それがすなわち電磁場で、保存されるものは電磁的電荷だというわけである。質量をもった成分の量子は、電磁的電荷が±1のものと0のものとがあり、それぞれW^+、W^-、Z^0という名前で呼ばれている（W^+とW^-はお互いに反粒子とみなされる）。

ベータ崩壊は弱い相互作用の典型的な例で、次のような仮の状態（"W"）を経る二段階の反応である。

$$d \longrightarrow u + \text{"}W^-\text{"}$$
$$\text{"}W^-\text{"} \longrightarrow e^- + \nu$$

これは、湯川理論によれば核力でWの代わりにパイオンが同じ役割をしたのと同じ事情だ。エネルギーが十分あればWを実際に創ることができる。

ワインバーグ‐サラム理論によれば、弱い相互作用はもう一つの中性の量子Z^0を媒介するもの（中性過程）がある。右のベータ崩壊に対応するのは

$$u(d) \longrightarrow u(d) + \text{“}Z^0\text{”}$$

$$\text{“}Z^0\text{”} \longrightarrow e^+ + e^-$$

……

だが、エネルギー保存則で禁止されるので実際には起こらない。しかし19章で述べたように、高エネルギーのν_p散乱によって中性過程の存在が実証された。

粒子としてのZ^0はCERN（セルン）のe^+e^-加速器LEP（レップ）によって初めて創られた（19章）。衝突する電子と陽電子の全エネルギーを徐々に変えてZ^0の質量に等しくなったとき

$$e^+ + e^- \longrightarrow Z^0$$

$$Z^0 \longrightarrow e^+ + e^-, \quad \mu^+ + \mu^-, \quad \nu_e + \bar{\nu}_e;$$

$$\longrightarrow u + \bar{u} \longrightarrow \text{多数のハドロン}, \quad d + \bar{d} \longrightarrow \text{多数のハドロン};$$

などの反応が突然起こるために反応断面積が非常に顕著な山を示す。これは11章で述べたJ/ψの共鳴状態の場合と全く同じ現象だが、創られたものがメソンではなくゲージ・ボソンであることが

ちがっている（図12・2参照）。このことは全反応断面積の大きさやレプトンやクォークに崩壊する率の比などから確かめられる。クォークの対が創られるとそれぞれは最後にいくつかのハドロンに変わる。一般に多数のハドロンが束になってある方向に発射される場合は非常に印象的でこれをジェットという。ジェットは高いエネルギーでのハドロン生成反応の特徴である。

Wのほうは、はじめFERMILAB（フェルミラブ）のp^+p^-加速器TEVATRON（テバトロン）によって創られた。例えばW^+の場合は、陽子の中の一つのクォークと反陽子の中の一つの反クォークとの衝突

$$u+\bar{d}\longrightarrow d+\bar{d}+W^+$$

$$W^+\longrightarrow e^+ + \nu$$

$$\longrightarrow \mu^+ + \nu$$

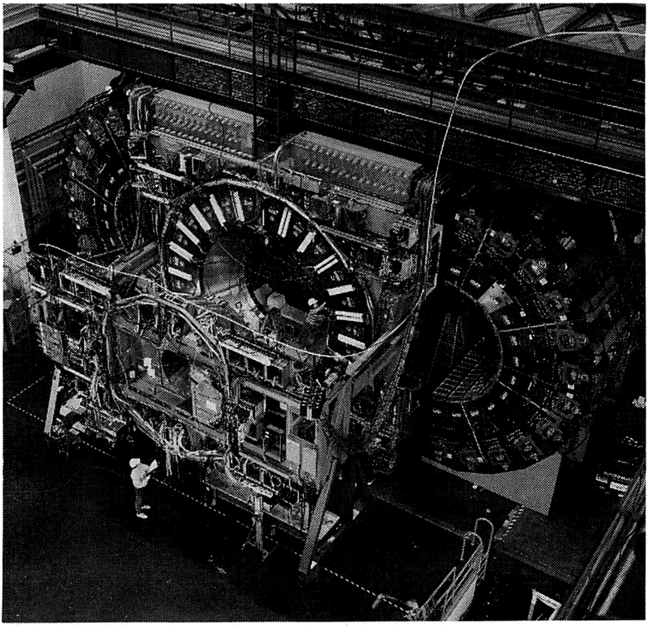
$$\longrightarrow u+\bar{d}\longrightarrow \text{複数のハドロン}$$

$$\longrightarrow c+\bar{s}\longrightarrow \text{複数のハドロン}$$

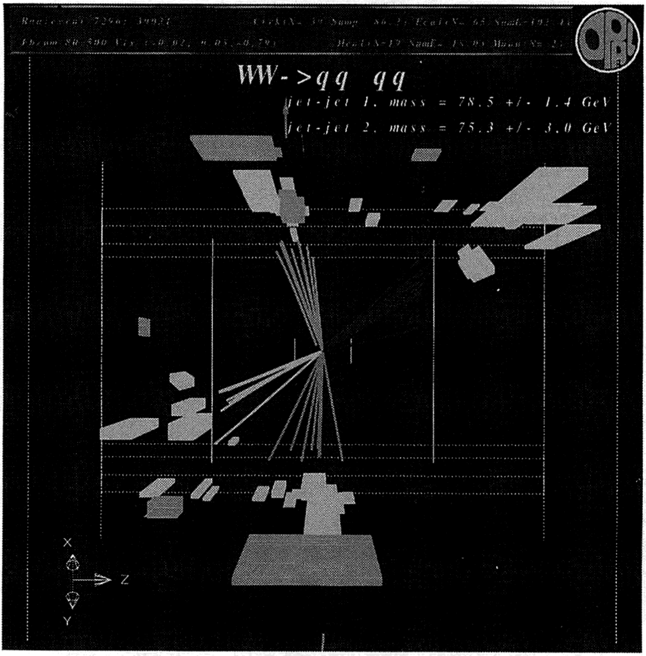
……

である。初めのp、$\bar{p}$ビームの各々のエネルギーは一TeVに近く、それが三個のクォーク（パートン）に分配されるとしてもWボソンなどを作るには十分だ。また最近のLEPⅡでも、W^+、W^-の対を創ることができる。

ZやWの崩壊反応の中で注目すべきはニュートリノができることである。ニュートリノは測定



20.3　TEVATRON の検出測定装置の一つ（CDF）。陽子，反陽子はそれぞれ反対方向から来て中央で衝突する。生成粒子は主に側面方向から出てまわりのリング状検出器で観測される（写真は解体されているところ）



20.4　W対発生の写真。LEP IIの検出装置の一つ（OPAL）における イベントの一例

$$e^+ + e^- \longrightarrow W^+ + W^-$$

$$W^+ \longrightarrow q_1 + \overline{q}_2, \qquad W^- \longrightarrow q_3 + \overline{q}_4$$

はじめの過程は電磁相互作用，次のは弱い相互作用による。Wボソン自身はすぐ崩壊するので見えない。クォーク，反クォークはそれぞれハドロン・ジェットを作っている

器を自由に通過してしまうから見えないはずだが、見える粒子だけではエネルギーと運動量の保存則が成り立たないこと（不足のエネルギーと運動量）から間接的に推定できる。Z^0がニュートリノの対になる場合は全然何も見えないのでこの過程の存在は直接にはわからない。しかしZ^0の崩壊確率はその質量の不確定性すなわちZ^0を創る断面積の山の幅に反映するので、この事実を利用して三種類のニュートリノ崩壊過程があることが確かめられた。粒子の世代の数がいくつあるかを教える理論は何もないけれども、このことから経験的に世代の数は三で、第三世代以上の基本粒子は存在しないだろうと信じられている（もし存在すればそのニュートリノは重くてZ^0を通しては創れないとしなければならない）。

③　ヒッグズ場

ヒッグズ場は弱いゲージ場の量子WとZに質量を与えて弱い相互作用の特性を実現し、ついでに物質粒子にも質量を与えるための補助場として導入された。ゲージ場は本来質量がないからそれに質量を与える理論的からくりがぜひ必要だが、物質粒子にはゲージの原理に相当するものがない。しかし17章の超伝導の現象では両方が関係しているし、すべての質量が同じ根源をもつと考えるのは理論的に魅力的でもあり自然でもあろう。

ヒッグズ場はレプトンのような電荷をもった二つの複素数のスカラー場（スピン0）から成り、弱いスピンの対をなす。ヒッグズ・ボソンH^0と言われているものはその電磁的に中性な一成

分の量子であるが、質量は予言できない。残りの成分は$SU(2)$のゲージ場W、Zと混ざってその成分に化けてしまう。ヒッグズ場はゲージ場ではないが、粒子の質量はすべてヒッグズ場との結合定数に比例して生じる。すなわち重い粒子ほどヒッグズ・ボソンを放出しやすく、W、Z、tなどを通してH^0を創ることができるはずである。例えば

$$u+\bar{d}\longrightarrow d+\bar{d}+(W^+)\longrightarrow q+\bar{q}+W^++H^0$$

$$e+\bar{e}\longrightarrow(Z^0)\longrightarrow Z^0+H^0$$

などの反応でH^0が創られ、ついで

$$H^0\longrightarrow t+\bar{t},\quad b+\bar{b};$$

$$H^0\longrightarrow W^++W^-,\quad Z^0+Z^0$$

などのように崩壊するだろう。ただしすべてエネルギー的に可能だと仮定しての話である。いまだにヒッグズ・ボソンができた形跡がないから、質量はトップ・クォークよりさらに大きいのであろう。

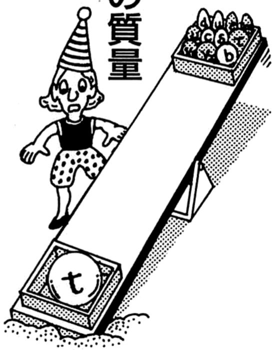
標準模型に含まれる粒子はヒッグズ・ボソン以外はすべて存在が知られており、それらの性質は過去十数年にわたる多くの実験によってしらべられてきた。強い力に関しては計算の困難が伴うが、強い力があまり関与しない問題の大部分については実験と理論とは一パーセント以内で見事に一致している。標準模型が正しい定量的理論であることは疑いない。もし将来ヒッグズ・ボ

ソンが発見されればめでたしめでたしである。

しかし標準模型はまだわれわれの理想にかなう真の理論だとは言えない理由が二つある。第一は強、電、弱の三つの力が完全に統一されていないこと、第二は粒子の世代の数や質量スペクトルを説明できないことである。

場の統一を後回しにして、次の章ではまず質量の問題を説明しよう。

21 素粒子の標準模型II——フェルミオンの質量



20章の図20・1にあげた基本粒子の質量を眺めてみよう。われわれに最も親しい第一世代のu、dクォークと電子はだいたい一 MeV のオーダーだが、第二世代以上になると質量はずっと大きくなりトップ・クォーク 100 GeV ＝ 10^{11}eV のオーダーである。これと反対にニュートリノは三世代とも特別に軽い。まだ質量がわかっていないのだが、一eVのオーダー以下であるらしいから、全部で一一桁もの範囲に広がっていることになる。しかもこの質量スペクトルを眺めてもはっきりした規則性が見えてこない。

もっと不思議なことには、Wボソンが媒介する過程はクォークの同じ世代の中だけで転換が起こるのではない（すなわち世代番号は保存量ではない）。例えば

$$u \longrightarrow d + (W^+)$$

ではなく、

$$u \longrightarrow d' + (W^+)$$

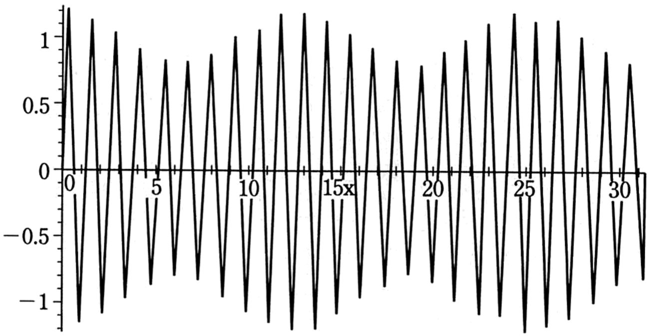
ここで、d′は第一世代のdに少し第二世代のsが混じった状態を意味する（18章のカビボ混合）。この事情は18章で「弱い相互作用の傾いた骨組」と形容したものである。

正確に言えば三つの世代が全部混じっている。すなわちWによる転換は$u \longrightarrow d$、$c \longrightarrow s$、$t \longrightarrow b$でなく$u \longrightarrow d'$、$c \longrightarrow s'$、$t \longrightarrow b'$で、d′、s′、b′は数学の言葉で言えばu、s、bの線形結合

$$u' = V_{11}u + V_{12}s + V_{13}b$$
$$s' = V_{21}u + V_{22}s + V_{23}b$$
$$b' = V_{31}u + V_{32}s + V_{33}b$$

になっている。係数Vの作るマトリックスはこのアイデアを生んだカビボ、小林、益川の名をとってCKMマトリックスと呼ばれている（ここでは弱いスピンの下の成分同士が混合するとしたが、上の成分同士が混合するとしても結果は同じになる）。このCKM混合のために第一世代よりも重い第二、第三世代のクォークが皆不安定で第一世代のクォークに変わってしまう。

それだけではなく、小林と益川が最初に指摘したようにCKMマトリックスが実数ではなく、虚数の部分を含むことから、CP保存則の破れが現れる（8章）。CPの破れはもともとsを含む中性KメソンK_1とK_2の間の転換として発見された。保存則の破れの中でも最も微細かつ不思議



21.1　ビート……波長の少し違った二つの波の干渉

な現象で、その根源はまだ理解されていない。これを追究するためにはもっとデータの精度と種類をふやすことが望ましい。筑波研究学園都市の高エネルギー加速器研究機構（ＫＥＫ）で建設中のＢファクトリーも、それが一つの目的である（Ｋが第二世代のｓを含むのに対して、Ｂは第三世代のｂを含む）。

　レプトン族の三種のニュートリノの質量や混合に関してはまだ確実なことが全く知られていない。ニュートリノは物質との相互作用が非常に小さいばかりでなく、質量も非常に小さく測定が困難である。質量自体よりも混合の事実のほうがむしろ観測しやすい。もともと三世代のニュートリノはそれぞれの世代の基本粒子（ｅ、μ、τ）に転換すべきだが、混合があればｅから創られた ν_e のビームが次の反応で μ に

転換する可能性がある。しかもちがった質量の二つの粒子の混合したビームは、ちがった振動数の波の干渉と同様に波数の差に比例したビートを起こすから、ν_eがν_μに変わっている確率がビームにそって振動する。だからビームの出発点とμを観測する場所との距離を変えていけば質量の差の見当がつく。

実際問題としては質量差が非常に小さく振動の波長が大変長いらしく、未だにはっきりした結論は出ていないが、その存在をほのめかす事実はいくつかある。太陽の中の核反応で発生したν_eの地球に到達する量が理論値より少ないことが何十年も前から問題になっていて、これはν_eが途中でν_μに変わっているからだという説がある。また宇宙線の中の高エネルギーのニュートリノは6章で述べたように$\pi \longrightarrow \mu \longrightarrow e$反応の副産物だから、$\nu_\mu$が二個につき$\nu_e$が一個できる（正確には$\pi$、$\mu$、eの電荷が正の場合には$\nu_\mu$、$\bar{\nu}_\mu$、$\nu_e$、負の場合には$\nu_\mu$、$\bar{\nu}_\mu$、$\bar{\nu}_e$）はずだがKAMIOKANDE（岐阜県神岡町）での観測では二対一より小さいのもニュートリノの混合によるという解釈が成り立つ。三つのニュートリノの質量と混合のマトリックスを正確に決めることは将来の実験に残された重要な課題で、ニュートリノのビームを何百キロメートルも先まで発射して観測する計画が各国で進められている。

このように質量のスペクトルやその起源は標準模型の中ばかりではなく、一般によく理解されていない問題である。しかし17章や19章などに出てきた超伝導のBCS理論が一つのモデルにな

る。超伝導のギンズブルグ－ランダウ理論というものは超伝導体の中に沈澱した電子のクーパー対の媒質を一つの場とみなす記述方式で、WS理論の中のヒッグズ場と実質的に同じものである。つまりWS理論の中のヒッグズ機構は超伝導体の中で質量ができる性質を抽象化したものであった。

それではヒッグズ場も本来は何かフェルミオンのクーパー対なのではないだろうか。こう考えるのは一面当然と言える。しかし素粒子の世界が必ず超伝導体と同じである必要はない。そこで理論家には二つの派ができる。一つはクーパー対が複合体だという立場をとり、もう一つの派は、ヒッグズ場は基本粒子やゲージ場と同じ資格の独立した場だとする。後の立場をとれば、ヒッグズ場は、当然、次に述べる統一場の理論の中に入るべきものになる。

ここでは第一の立場も可能だということを示すためにその例をちょっと紹介しておこう。

クォークは単独で存在しないから、その質量は直接観測で測れる量ではないが、ハドロンの性質などに間接的に影響する一つのパラメータである。質量に相当するパラメータが現象によってちがってもおかしくない。実際クォークの質量には普通「カレント質量」と「構成質量」と言われる二種類が定義されている。簡単に言って、カレント（電弱の「電荷」の流れの意味）質量とは、ヒッグズ場によって作られ、主に弱い相互作用に現れるパラメータであるのに対して、構成質量とは、ハドロンなどの強い相互作用に現れるもので、核子の中のu、dクォークの質量三〇〇

MeV はこれに属する。

超伝導体の中のクーパー対を分解して個々の電子にするにはエネルギーがいるから、電子は分解エネルギーの半分の質量をもったようにふるまうわけだが、そもそもクーパー対ができるのは電子同士の間に音の量子「フォノン」の交換による引力が働くからである。一般に粒子間に十分強い引力が働けば同様な現象が起こりうる。強い力の力学QCDでは低いエネルギーで結合定数がどんどん大きくなって、クォークの複合体ハドロンができるほどだから、ハドロンの中の個々のクォーク自身も質量をもらうことが当然期待されるであろう。この質量が構成質量と言われるものである。実際にはヒッグズ場によってまずすべての基本粒子にカレント質量ができ、クォークの場合はQCDがそれに水増しして構成質量ができると考えられる。核子（陽子、中性子）はクォーク三個でできているから、構成質量は核子の質量の⅓だと思えばよい。これに反して、種になるカレント質量は図20・1に示したように、ずっと小さい。しかし第一世代よりも重い第二、第三世代の場合にはもともと大きなカレント質量があって、QCDによる水増しは小さいと考えられている。

それでは色の力学QCDで質量ができる現象も、結果としては適当なギンズブルグ‐ランダウ‐ヒッグズ場で記述できるだろうか。答はイエス、そしてそのヒッグズ量子に相当するものはシグマ・メソン（σ）と呼ばれている（正確にはσはパイオン（π）と組んで標準模型のヒッグズ

場の組に相当するものになる)。

逆に、標準模型のヒッグズ場を複合体とする立場では、これが何かのフェルミオンのクーパー対の場だとみるわけである。しかしエネルギーのスケール(一〇〇GeV)はハドロンの場合(〇・一~一GeV)より二~三桁高いから、新しいフェルミオンと新しい強いゲージ場を仮定するのが自然であろう。このような理論をサスキンドはテクニカラー理論と名づけた。

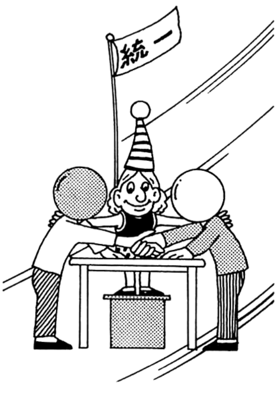
テクニカラー理論ではQCDのクォークに相当するものはテクニ・クォークで、同様に閉じこめられるが、その質量は一TeVのオーダーだとみられるから、加速器のエネルギーがもう一桁ほど上がれば、テクニ・ハドロンたちがどんどん出てくることが期待される。

もう一つヒッグズ場の経済的な複合理論の例を紹介しておくと、テクニ・クォークの代わりに既知の粒子トップ・クォークを使うことも可能である。すなわちヒッグズ・ボソンはトップ・クォークの複合体だというわけである。トップだけが他のフェルミオンに比べて特別重く、WボソンやZボソンと同じくらいだということはこの考え方に都合がよい。しかし本当の問題は階層性、すなわち他のフェルミオンたちがなぜ軽いのかということであろう。

22 統一場の理論

ワインバーグ‐サラムの$SU(2)\times U(1)$電弱統一理論が弱い相互作用に秩序を与え、くりこみ可能なゲージ場理論として、電磁力学と共通の枠の中に入れたばかりでなく、二つの力のちがいが対称性の破れによることを示したのはめざましい成功であった。しかも電磁力と弱い力を独立無関係なものとみなすのでなく、はじめから同じ枠の中で密接にからみあったものとして取り扱っている。しかし$SU(2)$と$U(1)$とは一応独立の場で結合定数は同じではない。そのうえ標準理論には電弱のゲージ場の他に、強い力の$SU(3)$ゲージ場があり、その結合定数は$SU(2)$、$U(1)$の場合よりかなり大きい。

この三つの場をすべて統一できないだろうか。そして真の統一とは三つの力がみな単一のゲージ場の成分になっているようなものであるべきではないだろうか。



三つの力の統一を大統一という。大統一理論にはいろいろの候補があるので、これらは一般に

GUTS（Grand Unified Theories）と言われている。GUTSの夢を可能にするのは、すでに何度も述べたように結合定数が観測するエネルギーまたは長さのスケールによって変わるという性質があることである（これはゲージ場ばかりでなく一般にくりこみ可能な理論に共通の性質である）。ただQCDのような非アーベル場とQED——電磁力学——のようなアーベル的ゲージ場の場合とでは結合定数のふるまいが反対で、前者ではエネルギーが上がるとともに小さくなるのに反し、後者では大きくなる（エネルギーを低くすればその逆であることはもちろんだが、ただし対称性が破れてゲージ場に質量ができるとその結合定数はそれ以下のエネルギーでは変化が止まってしまう）。

この性質は大統一の可能性を強く支持するように見える。なぜならば、最も大きい非アーベル場$SU(3)$の結合定数はエネルギーとともに小さくなり、最も小さいアーベル場$U(1)$の結合定数は逆に大きくなるから、あるエネルギーにおいて三つの結合定数が一致するかもしれない。そうすれば結合定数はもともとただ一つで、三つのゲージ場はそれらを包括する何か単一のゲージ場の異なった成分にすぎないと言えるかもしれない。対称性の破れという現象が起こるために一つのゲージ場が低いエネルギーの現象においては三つの異なる部分に分裂して現れるのではないか。

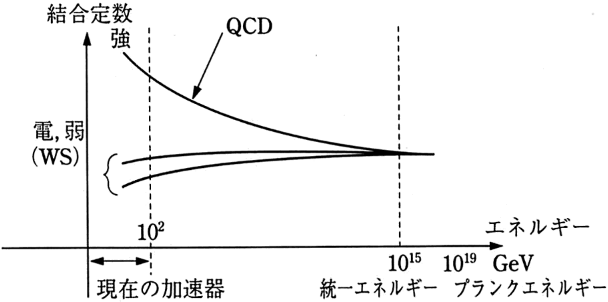
とてつもないエネルギー……でもナンセンスとは言い切れない

もし本当ならば、これはすばらしい着想であるが、統一が実現するエネルギーとはどれくらいだろうか。電磁場の微細構造定数が $e^2/\hbar c = 1/137$ であったから、$SU(2)$と$U(1)$結合定数もおなじオーダーである。QCDにおいては、グルーオンの結合定数は一GeV程度のエネルギーでは〇・三内外の値が得られている。結合定数の変化は対数的に緩やかなものだから、これらの変化をグラフにしてみると、お互いに近づきあうのは10^{15} GeVくらいのエネルギーになることがわかる（理想は三つが同じエネルギーで完全に一致することだが現在のデータではそうはならないようだ。しかし後に述べるように、超対称性をとりいれて標準理論を拡張すれば10^{16} GeVあたりで三つが一致することがわかっている）。

今の加速器の最高エネルギーが一TeV（$=10^3$ GeV）程度だから、それより一二〜一三桁も大きい。こんな値は本当に意味があるだろうか。

でも一概にナンセンスと決めつけるわけにはいかない。現にマックスウェルの方程式は波長数百キロメートルから10^{-16}センチメートルに至る電磁波を正しく記述している。ニュートンの力学は日常の現象から、天体の運動にまでまちがいなくあてはまるし、アインシュタインの重力は宇宙全体――距離にして10^{27}センチメートル――にまで適用されているではないか。

10^{15} GeVというエネルギーは、一個の素粒子のもつエネルギーとしてはとてつもないものだ



22.1　電磁場とグルーオン統一のエネルギー

が、日常のスケールから見れば大したものではない。わずか10^{-9}グラムにすぎないのである。しかも、もっと大きな質量の単位が既知の理論の中に含まれている。それはプランク質量と言われるもので、重力場が、他の力と同等に重要になり、量子力学的にとり扱わねばならなくなるエネルギーの領域である。これは10^{19} GeV（10^{-5}グラム）に相当するから、まだ四桁ほど上である。

すでにランダウはくりこみ理論が出た当時に、それと重力場との関係に着目して、電子やミューオンのような素粒子が一ダースほどあれば、プランクエネルギーのところで重力場と電磁場との統一が起こるだろうと指摘した（素粒子の数によって結合定数の変化の度が変わる）。

統一場の理論はもとをただせばかなり古い歴史をもっていて、アインシュタインの重力場の理論が発端だと言ってよろしいであろう。アインシュタインの考えでは、重力とは空間の幾何学的性質を反映するものにほかならない。天体のまわ

りで物体が直線運動をしないのは、空間自身が曲がっているからである。地球のような球の表面を真っすぐに走っていけば、一周して元にもどってくるが、本当に平たい面では永久にもどることはない。これは球面と平面の幾何学的構造のちがいによるもので、球面の上で物体に力が働いていると考える方が不自然であろう。アインシュタインによれば重力もこれに似た現象である。

重力場以外に到達距離の長い力として知られているのは電磁力だけで、この事情はアインシュタイン時代から変わってはいないが、重力が幾何学に帰着されるのならば電磁力も同様に取り扱えないだろうか。このような考えが浮かぶのは当然のことで、有名な数学者ヘルマン・ワイルは時空の幾何学的性質をアインシュタインのものより拡張することによって、重力と電磁力の統一を試みた。

またアインシュタイン自身も晩年は統一場理論を完成すべく努力を続けたが、結局満足な結果は得られなかった。しかし統一場の理想は死なず、ワイルがまいた種子は最近になって急に芽生えてきた。内容ははじめとは少し異なるが、これがゲージ場の考えで、ゲージという名前はそもそもワイルがつけたものである。

ワインバーグ‐サラムの理論で統一されたのは、重力と電磁力ではなく、電磁力と弱い力であった。そしてその次の段階では強い力をも合併しようとする。これが「大統一理論」またはGUTS（ガッツ）の趣旨である。

大統一では残念ながら本尊であるアインシュタインの重力理論はまだ含まれていない。重力場を量子論的に扱おうとすると、くりこみ理論では手に負えない発散がでてくる。しかし重力を併合する大大統一というべきものの候補者はすでに存在する。次の章で述べる超弦理論（super-string）がそれである。しかし超弦理論はまだ発展途上にあって実在の世界にうまく対応するかどうかはわかっていない。

実際問題としても、重力の量子的効果が素粒子に影響してくるのは、さきほどのプランクエネルギーの領域だから、実験的検証をすることもできない。それよりも、当面の問題は大統一、すなわち重力場以外の力——強、電、弱——を統一し、それと同時に物質粒子——クォークとレプトン——をも統一することであろう。これについては次の章で詳しく論じることにしよう。

23 大統一のプログラム



最後の問い

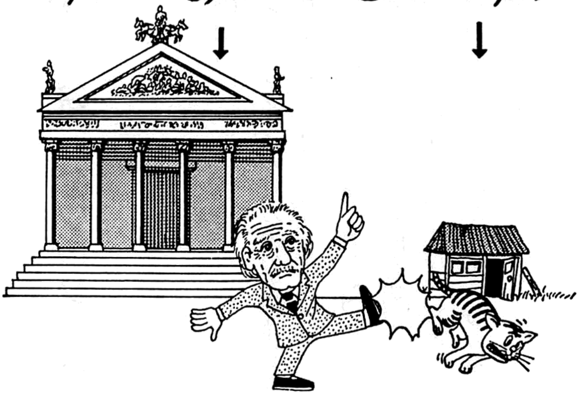
アインシュタインの重力場の方程式とは、重力場が物質の分布によって決まることを示すもので、次のように書かれる。

$$R_{\mu\nu}-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}R=8\pi GT_{\mu\nu}$$

この式の美しさは、数学的意味がよくわからなければ味わえないだろうが、大ざっぱに言えば、左辺は時空の曲がり、すなわち重力場を表し、右辺は物質のエネルギー、すなわち粒子、電磁場、その他時空の中に存在するあらゆるもののエネルギーを表している。Gはニュートンの重力定数である。

アインシュタインはかつて、この式は調和がとれていないと不満をもらしたことがある。建物にたとえて見れば左翼は美しい大理石作り、右翼は粗末な木造だというのである。なぜならば、

$$R_{\mu\nu}-\frac{1}{2}g_{\mu\nu}R=8\pi G T_{\mu\nu}$$



アインシュタインの不満

左辺の重力場は美しく単純な幾何学的原理に基づいているが、右辺は実は非常に複雑で気まぐれに見えるからである。

ただし右辺の中でも電磁場の部分は例外で、これがゲージ場として一種の幾何学的原理に帰着されることはすでに学んだ。さらにＷＳ理論とＱＣＤを加えれば弱い力、強い力も一種のゲージ場にほかならない。結局残るのは物質粒子、すなわちレプトン、クォークなどである。大統一の理論では当然、これら物質粒子をも統一せねばならない。しかし物質粒子にあてはまる幾何学的原理はあるだろうか。

この最後の質問に対する決定的な答はまだない。超対称（スーパー・シンメトリー）の理論（24章）というものがあって、フェルミオン（すなわち物質粒子）とボソン（力の場）をひ

とまとめに取り扱うことができるが、本当の問題はなぜ物質粒子が質量をもつかである。さまざまなレプトンやクォークがそれぞれ勝手な質量をもっていて、その間に何の規則性もないように見える。アインシュタインの方程式の右辺が複雑な主な原因はここに存する。質量のない場や粒子を幾何学的原理や超対称の原理にあてはめるのは比較的簡単なのである。

実際このような大統一ゲージ場の候補者はいくつかあるが、その中でもっとも簡単で代表的なものとして、ジョージャイ－グラショウの$SU(5)$理論というものを紹介してみよう。

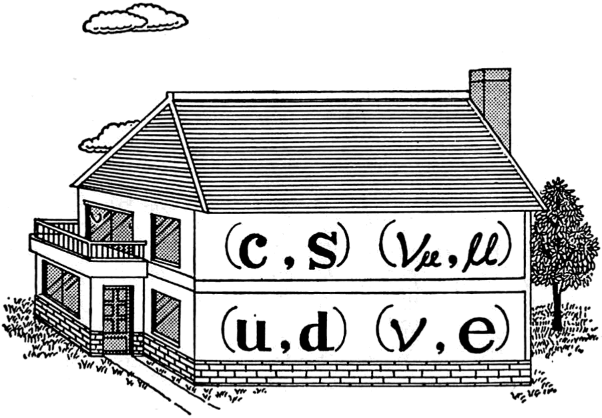
ジョージャイ－グラショウの$SU(5)$大統一理論

まず$SU(5)$のゲージ場からどういうふうに標準理論が導かれるのかを説明しよう。理論家が考える「シナリオ」は次のようである。

$SU(5)$の対称性をもった世界から標準模型を経て実際の世界を導く過程は

$$SU(5) \longrightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1) \longrightarrow U(1)$$

と二段階になるから、ヒッグズ場としては異なった性質の二種類が必要である。その一つによってまず第一回目の対称性の破れが10^{15} GeV のスケールで起こるとしよう。そしてそのヒッグズ場と$SU(5)$ゲージ場の成分の一部と第二のヒッグズ場の成分の一部とが質量を得る。これらの量子は10^{15} GeV のスケールだから加速器ぐらいでは創れない。



クォーク，レプトンの第１世代と第２世代

20章によれば、U（１）は一個、SU（n）はn^2-1個の量子数をもつ。SU（３）の二個、SU（２）の一個、U（１）の一個、あわせて四個の量子数がSU（５）の量子数になる。しかしゲージ場の成分の数はn^2-1個だから、SU（５）では二四もあり、SU（３）×SU（２）×U（１）の成分の総和 ８＋３＋１＝12 よりも多い。残りの一二個が大統一のエネルギー程度の非常に重いボソンになるとするわけだ。

あとに残った成分はSU（３）、SU（２）、U（１）の三つのゲージ場と物質粒子と第二のヒッグズ場の一部とで、このヒッグズ場が標準模型の筋書きに従って一〇〇GeV のスケールで第二回目の対称性の破れを起こし、弱い力の量子W、Zと物質粒子に質量を与え、電磁のU（１）場と色のSU（３）場だけが質量のない本

来のゲージ場として実際の世界ができあがる。

次に物質粒子の方はどうか。一世代には色を勘定に入れてクォークが六個、レプトンが二個あるが、初めに質量がなければ左巻きと右巻きの成分は独立であり、反粒子では左と右が入れ替わる。このことを考慮してジョージャイとグラショウは次のような五個組から出発する。残りの粒子は？　との質問に対する答はちょっと待っていただきたい。

$$\begin{pmatrix} \bar{d}_R \\ \bar{d}_G \\ \bar{d}_B \\ e \\ \nu \end{pmatrix} \text{左} \qquad \begin{pmatrix} d_R \\ d_G \\ d_B \\ \bar{e} \\ \bar{\nu} \end{pmatrix} \text{右}$$

これら五つの粒子を全く同等だと考えれば、$SU(5)$の対称性をもち、それらの間の勝手な変換が許されることになる。しかしはじめの三つと、あとの二つとを分けて、それぞれの間だけの変換に限定すれば、$SU(3)$と$SU(2)$とになる。

この式を見てわかるように、前者は色を変え、後者はレプトンの香りを変える。すなわち強い相互作用と弱い相互作用を意味すると思えばよろしい。弱い力の$SU(2)$は粒子の右巻き成分にしかないことに注意されたい。これで$SU(3)$と$SU(2L)$とが五個組に含まれることがわかった。

それではWS理論の$U(1)$に相当するのは何かというと、これはクォーク（はじめの三つ）とレプトン（あとの二つ）を区別する量子数だと考えられる。そして電磁的電荷は

$$\begin{pmatrix} 1/3 \\ 1/3 \\ 1/3 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{左} \qquad \begin{pmatrix} -1/3 \\ -1/3 \\ -1/3 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{右}$$

からわかるように、組の中での和は0になっている（この性質はゲルマン、ツワイクのクォーク仮説で使われたものと同じだ）。

$\bar{d}_R$　$\bar{d}_G$　$\bar{d}_B$　e　ν	d_R　d_G　d_B　$\bar{e}$　$\bar{\nu}$
左巻き5個組	右巻き5個組
$\bar{u}_B$　$\bar{u}_G$　u_R　d_R $\bar{u}_R$　u_G　d_G u_B　d_B $\bar{e}$	u_B　u_G　$\bar{u}_R$　$\bar{d}_R$ u_R　$\bar{u}_G$　$\bar{d}_G$ $\bar{u}_B$　$\bar{d}_B$ e
左巻き10個組	右巻き10個組
$\bar{\nu}$	ν
左巻き1個組	右巻き1個組

23.1　$SU(5)$による1世代基本粒子の分類

しかしこれだけではまだ一世代の粒子の成分の一部しか勘定していない。d、$\bar{\text{d}}$、e、$\bar{\text{e}}$の左右成分のうちの半分とuの全成分はどうするのか。答はやや複雑だが、これらは量子数に関しては右の五個組の異なる成分二個から作った複合体と同様だと考えるのである。二つの成分をx、y座標にとると、図のような一〇個組とその反粒子一〇個組に並べられる（チェックは読者諸君にまかせよう）。ただしνの右巻き成分と$\bar{\nu}$の左巻き成分とが取り残されていて、これらはそれぞれ孤独な一個組をなすとする。ニュートリノが全然質量をもたなければこれらはなくてすむが、現在ではニュートリノの質量は小さいが0ではないとみなされている。また理論的にはこの孤独なニュートリノ成分が特別ちがった性質をもっているという可能性もある。

このような考え方はハドロンの場合の坂田モデル（一二五ページ）に似ている。坂田モデルでは陽子、中性

子、ラムダ粒子が香りの$SU(3)$を担う基本粒子で、他のバリオンすなわちシグマ粒子、グザイ粒子などはこれらの合成系だと見なされた。

まず対称性（または量子数）の立場から最小限度に必要な基本粒子の組をえらび、他の粒子をそれらの複合体として取り扱うのが、モデルを作る理論家の常套手段であるようだ。けれども坂田モデルはクォークモデルでおきかえられた。八つのバリオンの中の三つだけを基本粒子ととることに無理があったからである。

では今の$SU(5)$の場合も同じ歴史が繰り返されるのではなかろうか？　五個組をなす粒子はクォークやレプトンの構成要素となるもう一つ下層の粒子ではなかろうか？

右のような疑問が生じるのは当然で、いろいろ想像をたくましくした理論家もいる。しかしこれが正しい方向かどうかはわからない。その一つの理由はハドロンの場合とちがって、クォークやレプトンが広がりをもつ複合体だという徴候がまだないことである。また$SU(5)$の代わりに、全世代を同等に取り扱う理論もいろいろ作ることができる。しかし何よりも大切なのは$SU(5)$の理論が事実にそっているかどうかである。

大統一理論の予言

そこで大統一理論からどんなことが自然に予言されるかを考えよう。まずクォークとレプトン

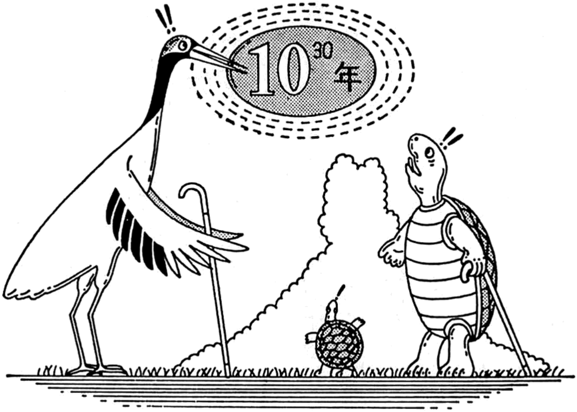
がいっしょになって五個組になれば、ゲージ場との相互作用によってお互いに転換しあうことができる。そうでなければ五個組を考える意味がない。ところでクォークはあらゆるバリオンまたは原子核の構成要素、したがってバリオン数の担い手である。バリオン数は電磁的電荷のように厳密に保存されるものと考えられてきた。しかし$SU(5)$の対称性が破れればバリオン数も保存しなくなる。例えば陽子pは

$$p \longrightarrow e^+ + \pi^0, \quad e^+ + \gamma$$

などの崩壊反応で壊れるかもしれない。核子と電子とでできあがっているわれわれの世界は消えてなくなってしまう。

これはゆゆしき問題で、無視するわけにはいかない。$SU(5)$がまちがっているのではないかとすぐ考えられるだろうが、陽子が崩壊するにしても、その寿命はどれくらいかを検討する必要がある。そのうえバリオン数はもともと「電荷」ほど神聖な保存量ではなさそうだとは一般的にも言えることである。なぜなら、バリオン数に比例するクーロン型のゲージ場が存在しないことがわかっている。すなわちバリオン数の保存を保証するからくりがないわけである。

陽子の崩壊は原理の問題としてはたいへんな意義をもつが、その寿命は、理論的には大統一エネルギーの逆数に比例し、10^{30}年のオーダーと見積もられる。宇宙の現在の年齢10^{10}年と比べても圧倒的に長いので、別に物質の消滅を心配する必要はない。しかも幸いなことにこの寿命は実験的



鶴は千年，亀は万年，陽子の寿命は10^{30}年？

に検証しうるぎりぎりのところにある。すなわち一トンの物質（何でもよい）は10^{30}のオーダーの陽子（および中性子）を含むから、そのなかで一年に一個程度の崩壊が起こるはずである。だから例えば一〇〇〇トンの水を測定器として使えば、一日に数個程度になり、実行可能である。ただし宇宙線による反応に紛らわされないためには地下で行わねばならない。

　このような実験は一九八〇年代に神岡鉱山の施設KAMIOKANDEなど世界各国で続けられたが、陽子崩壊の証拠はまだつかまえられていない。このことは大統一のエネルギーがもっと高いことを意味するのかもしれない。そのうえ前に述べたように、標準模型の三つの結合定数の曲線は完全に一点では交

わらない。

ではSU(5)に代わる理論ではどうか？　標準模型を超対称化した超対称標準模型が一つの可能性である。これは標準模型のヒッグズ場を二組にふやし、さらに場と粒子にすべてスーパー・パートナーを加えたもので、SU(5)に移せば超対称SU(5)である。成分の数を倍にした結果、統一エネルギーが一桁上がって10^{16} GeVになり陽子の寿命が二桁のびるばかりでなく、三つの曲線がきれいに交わることがわかった（図22・1）。しかし超対称の詳細は次の章で説明するからそれまで待っていただきたい。

大統一にはほかにもいろいろな理論やシナリオが試みられてきたが、以上でわかるように、まだ決定的な理論は出ておらず、未解決の問題がたくさん残っている。一般的な特徴として言えるのは、統一エネルギーのスケールが非常に大きいことである。では標準理論のエネルギーのスケール10^2 GeV以下と大統一エネルギー10^{15} GeV以上の間には何も新しい現象は起こらないのだろうか？　その中間はサハラ砂漠のような不毛の領域なのだろうか？

もしそうだとしたらなぜだろうという疑問が生ずる。大統一の対称性の破れは二段階で起こる。しかしいま第一段階の立場にいるとして、理論のどこに、次の段階が十数桁も小さいところで起こることを示す小さいパラメータが入っているのだろうか？　もし入っていたとしても、そんなパラメータは実に不自然ではないか。

この疑問は階層性（hierarchy）の問題、あるいは大きい数（big numbers）の問題として知られている。大きい数とは、桁数あるいは対数で表したほうが都合のよいような数のことだと思えばよい。階層性については大統一エネルギーと標準模型のエネルギーの間ばかりではなく、標準模型の中だけでもトップ・クォークからニュートリノにまたがる階層性があることはすでに述べた。

さらに視野を広げれば実は宇宙は階層性ばかりだ。宇宙の大きさ10^{28}センチメートルからはじまってプランクの長さ10^{-33}センチメートルにいたるまで六〇桁以上に広がって、その間にたくさんの階層がある。人間（生物）のスケールはその幾何平均ぐらいのところを占めている。かつてディラックは大数の仮説というものを提唱して、大きい数同士の間にも簡単な関係を予想したが、これはまだ仮説にとどまっている。

それはともかく、リビングストン曲線という経験法則があって、加速器のエネルギーは一〇年ごとに一桁上がってきた。サイクロトロンが発明された一九三〇年ごろのエネルギーは MeV のオーダーであったが、六〇年以上たった現在のエネルギーは TeV だから確かに六桁上がっている。しかし大統一エネルギーはさらに一二桁上だ。もしこの曲線をそのまま未来に延長してみたら一二〇年先になる！　二一世紀の素粒子物理は何もないのだろうか？

いろいろの意味で素粒子物理学は現在一つの転換期に直面している。加速器を実験的武器と

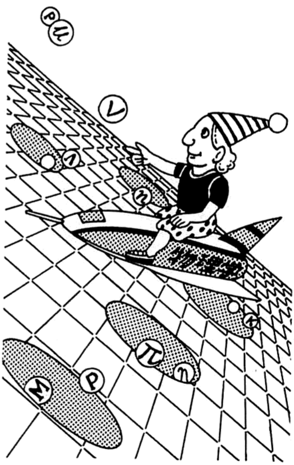
し、次から次へと未知の粒子を追究する、いわばローレンス－湯川的探究方法は過去六〇年めざましい発展をもたらしたが、これが将来も同じ調子でいつまでも続くとは考えにくい。このことを念頭に置きながら、素粒子物理学の最近の動向を最後に紹介しよう。

24 素粒子物理学のゆくえ

素粒子論と宇宙論との融合

10^{15} GeV のエネルギーを実験室で実現することは不可能だが、物理学者は他の現象を巧みに利用することを考えた。それは宇宙論と結びつけることである。宇宙論はこの本の対象ではないので、あまり立ち入った説明はできないが、現在一般に受け入れられている見解によれば、宇宙は一〇〇億（10^{10}）年から二〇〇億年ほど前に、ビッグ・バン（大爆発）から出発し、現在まで膨張を続けている。

　この膨張を支配するものはアインシュタインの方程式であり、宇宙の大きさはプランクの長さ 10^{-33} センチメートルから現在の 10^{28} センチメートルまで変わる。前者はプランク質量（10^{19} GeV）の逆数に相当する長さであるから、その中の物質のエネルギー（または温度）がこのような高い状態から出発するわけである。その後の宇宙の進化のようすが、基本粒子やゲージ場の性質に影響



されることは容易に理解できるであろう。

①　宇宙の中のバリオンの数の問題

例えば宇宙の物質はバリオン（陽子や中性子）から成り立っていて、反バリオンが見あたらないのはなぜかという問題がある。もちろん粒子と反粒子とは対消滅できるから、究極的には余計な分だけが残るだろうが、宇宙のバリオン数は10^{80}というとてつもなく大きなものである。粒子と反粒子の対称性（C）により、もともとどちらも同じだけある、すなわち量子数としての全バリオン数は0になるべきではないだろうか（この数は宇宙の中の光子の数10^{88}と比べれば少ない。しかし光子の場合は粒子と反粒子の区別がないから別におかしくない）。

大統一の理論に基づけばこの問題は解決される可能性がある。今まで何度か述べてきたように、弱い相互作用はいろいろな保存則をよく守っていない。CPの破れやバリオン数の非保存（陽子の崩壊）の性質を考慮すれば、宇宙の発展の途中でバリオンと反バリオンとの間に不均衡ができうることが指摘されている。ただし不均衡の大きさが大統一の理論や宇宙発展の歴史の詳細によることは言うまでもない。

②　見えない物質

このほか素粒子物理と宇宙物理とがお互いに援助できる領域として、宇宙の中の全質量の問題がある。宇宙の中に星のような目に見える物質以外のものがたくさんないと困るという理由がい

くつかある。例えば宇宙の中の物質は膨張にブレーキをかける作用をする。この事実を使って宇宙の寿命と膨張速度から物質の量を逆算すれば、目に見える物質だけではだいぶん足りない。では目に見えない物質とは何だろうか？ 素粒子物理はこれにいろいろの候補者を提供してくれる。ニュートリノもその一つで、それからの寄与の量はニュートリノの質量のいかんによる。また大統一理論の中では、アクシオンと呼ばれる、非常に軽い中性ボソンの存在する可能性もある。しかし素粒子物理の側からのニュートリノ質量の決定やアクシオン探しはまだ成功していない。

③ モノポールなどのソリトン

ニュートリノやアクシオンは軽い粒子であるが、大統一理論の中にはもちろんいろいろな超重粒子も含まれている。その中で特異なものはモノポール（単磁極）だ。

モノポールは電荷の代わりに磁荷をもった仮想粒子のことで、磁石の北極や南極が孤立したような存在である。普通の電磁力学の枠の中にはおさまらない。むかしディラックは電磁力学を拡張し、電気と磁気との対称性を保とうとして、モノポールをいわば発明したのであるが、大統一理論の枠の中では、素粒子として導入しなくても一種のゲージ場のかたまりとして必然的に存在することがわかったため、これをつかまえようとする努力が一時盛んに続けられた。磁荷の単位は電荷の単位 e の逆数で、

$$\frac{eg}{\hbar c}=\frac{1}{2}$$

という関係になければならない。これをディラックの条件という（ただし大統一モノポールの磁荷は二gである）。$e^2/\hbar c=1/137$ であるから、磁荷については $g^2/\hbar c=137/4$ というたいへん大きな値になる。二つの磁荷gの間にg^2に比例クーロン型の力が働き、これが電荷同士の場合の五〇〇〇倍も大きいというわけである。

　大統一理論のモノポールの質量は大統一エネルギーのg倍ほどで（$\fallingdotseq 10^{-7}gm$）、しかも安定だから、モノポールは宇宙の中に塵埃のように漂っているかもしれない。理論的には、宇宙発展のある時期においてモノポールが多量に発生する可能性があり、かえってこれが理論家の頭痛の種になっている。電気的には中性だが磁気的に観測することができるはずだから、モノポール探しはクォーク探しのように一時盛んに行われた。しかし未だにモノポールが存在するという証拠はない。

　モノポールの他にもゲージ場のかたまりはいろいろな種類が存在する。ここで「かたまり」とは、専門語で一般に（ゲージ場に限らず）位相的ソリトン（topological soliton）と言われているものの意味で使った。これらのソリトンはまずその次元によって区別できる。大統一理論のモノポールは普通の粒子と同じく空間的には点で、時空的には一次元（世界線）をなすソリトンで

ある。13章のひものように、空間的には一次元、時空的には二次元表面をなすソリトンも存在する。例えば超伝導体の中のアブリコーソフ磁束がそれだ。他の次元のソリトンも可能である。ゲージ場の四次元ソリトンはインスタントンと呼ばれる。空間的にも時間的にも局在し、瞬間的に現れては消えるはかない存在であるが、それが理論的にCPやバリオン数の保存を破るという奇妙な触媒効果を起こすことで知られている（しかしすでに述べたようにバリオン数の破れの証拠は見つかっていない）。

ポスト・モダン的物理学

これまでの説明でおわかりのように、素粒子物理は一〇〇GeVのエネルギーの程度までは標準模型が正しいということがみごとに実証されたが、その上の新しい段階になると、大統一エネルギーに至るまでまだ実験の面でこれは、というはっきりした手がかりがなにも出ていない。それにもかかわらず、純理論の方面では非常に斬新なアイデアがいくつか出て、過去二〇年以上もの間にめざましい発展を示してきた。それは次の三つの基本概念を柱としてたてられたものである。

① 超対称性（スーパーシンメトリー）
② カルーザ - クラインの多次元空間理論

③　超弦理論（スーパーストリング）

このうち第三の超弦理論は一と二とを巧みに取りいれ、重力場も物質場もあらゆるものを統一できる可能性をもった理想的理論の候補者として嘱望されている。以下順を追ってこれらを説明していこう。

①　超対称性

超対称性の名前はすでに何度も出したが、その内容はまだくわしく説明しなかった。超対称性とは、ボソンとフェルミオンをまとめて一組とし、それらの間の対称性を議論する考えであって、数学的には群論を少し拡張した概念を使うのが特に新しい点である。

大統一理論は、三つの力のゲージ場を統一する理論であった。しかしこの世界はいわゆる物質を含み、その素粒子としてはクォークやレプトンなどの基本粒子がある。大統一理論では力の場の統一と同時にこれらを一応一つの組にまとめられるが、もしゲージ場と基本粒子の場を統一することができれば、統一の概念をいっそう進めたことになる。

超対称性の理論は一九七〇年代にズミノとウェスの協力した仕事のほか、多くの人たちの貢献によって完成された。超対称がいままでの対称性の概念とだいぶちがっている点は、時空的性質が異なるものの間の対称性であることだ。すなわち物質粒子はスピンが½でフェルミ統計に従うのに反し、ゲージ場ではスピンが1でボース‐アインシュタインの統計に従う。だから粒子と場

の統一では、$SU(n)$ のような粒子間の対称性（内部対称性）の問題ではなく、時空の対称性が問題になる。時空の対称性に関してはすでに8章で説明したが、大別して時空座標の平行移動に対する対称性と、回転に対する対称性がある。回転には空間的な回転と、時間空間の間の回転とがあり、後者は動いている座標系に移ることである（空間や時間の反転もこれらのなかに含まれる）。二種類の回転をいっしょにしたものはローレンツ変換という変換群を作り、さらに平行移動の群を併せたものをポアンカレ群と言う。すなわち時空の対称性とはポアンカレ群のことである。エネルギー、運動量、角運動量（スピンを含めて）の保存則はそれぞれ時間の平行移動、空間座標の平行移動、空間座標の回転の対称性に基づくものであることはもうご存じだろう。それではポアンカレ対称性よりももっと大きな時空の超対称性とは何だろうか。なにか新しい保存則が存在するのだろうか。

　超対称性は抽象的数学的な考察から導かれたもので、右のような直観的な説明を与えることはむずかしい。しかし統一の目的からわかるように、スピンを½だけ変え、同時に統計も変えるものでなければならない。統計は量子力学に特有な性質であり、特にフェルミ統計は二つの粒子を入れ替えると、状態を表す波動関数というものの符号が反転することを意味する（例えば二つの同じ性質の粒子が同じ場所を占めていたとすると、それらを入れ替えても状態は変わらないのに波動関数 ψ の符号が変わる。すなわち $\psi=-\psi$、ゆえに $\psi=0$。つまり物質粒子にこういう状

態が許されないことは六七ページで説明しておいた）。それで量子場の理論でフェルミオンを表すには反可換な性質をもった異様な数を使わねばならない。反可換な数とはその任意の二つA、B（ただし0でない）の積が

$$AB=-BA,\quad AA=0,\quad BB=0$$

という関係をもつことである（ただし、すべての量がお互いに反可換ではない）。

　これに対してボース統計の場は普通の数

$$AB=BA$$

の性質をもつから、もしボース場とフェルミ場とを統一しようと思えば、スピン（回転に関する変換性）がちがい、可換性がちがう二種類の数を混ぜ合わせるという操作を考えねばならない。超対称性が非常に数学的抽象的な概念であることがわかるだろう。

　それでこれ以上の詳細はやめて、結果だけを言うと、超ポアンカレ群とは平行移動の平方根とローレンツ群から作られるものである。では平行移動の平方根とは何か？

　ここで、ごくやさしいたとえを使ってみよう。人が歩くときは両脚を交互に使う。例えばまず左脚を前に出し、次に右脚を前に出す……ということを繰り返して前進するわけである。二回目でもとの姿勢にもどり、体は前に平行移動するから、一回の前進はその平方根と解釈できる。超対称の操作もこれに似ていて、例えばあるスピン0のボソンの位置を少し動かすのに、まずスピ

ン½のフェルミオンに跳び、次にスピン0にもどったとき位置が動いているようにする。フェルミオンの場合も同様に定義できる。前方への移動はいくらでも続けられるのに対して、左右への動きは限られていて、左左、右右のように続けることはできない。これが前述の反可換数の性質$AA=0$，$BB=0$に相当するものである。

超対称性はポアンカレ対称性の拡張ではあるが、それから出てくるものは新しい時空的保存則ではなく、ボソンとフェルミオンの間の完全な対称性である。その意味は

(1) 一つのボソンがあれば、それとスピンが½だけずれていて電荷（内部対称性）や質量が同じフェルミオンが存在すること、

(2) これらボソンとフェルミオンの成分の数が同じであること、

である。成分の数を数えるには、質量のある場合とない場合とで少しちがい、詳細は省くが、スピンの向きや粒子と反粒子のちがいも別々に勘定する。

こういう超対称の組はいろいろ可能で、例えば次のような組合せが作れる。

(1) スピン0のボソンとスピン½のフェルミオン
(2) スピン½のフェルミオンとスピン1のゲージ場
(3) スピン3/2のフェルミオンとスピン2の重力場

ちょっと見るとこれらは自然界にうまく適応しているようだ。(1)は標準理論の中のヒッグズ場

と基本フェルミオンの組合せのようだし、(2)は基本フェルミオンとゲージ場の組合せのようだ。(3)の中の重力場は確かに存在する。

だがもう一度考え直せばすぐ全部だめだと気がつく。標準理論の中の粒子は質量がみな異なっている。たとえそれが対称性の破れ（内部対称性と超対称性の両方）によるとしてもボソンとフェルミオンの内部量子数が合わず、成分の数も合わない。例えばクォークは色の量子数に関して三個組だが、グルーオンの量子数は八個組だ。また質量のない重力場の量子（グラビトン）の存在は誰も疑わないが、スピン3/2のフェルミオンは質量のあるなしにかかわらず知られていない。

本当に超対称性は自然界に存在するのだろうか？　もし存在するとしたら、標準模型の中の場と基本粒子が組んで統一されるのではなく、その個々の成分にそれぞれ未知の重いパートナーが同じ数だけいるとしなければならない。基本フェルミオンとゲージ場はあくまで別物である。これではじめの統一の目的を達したことにはならないし、こんなことを仮定する必然性もない。

自然界に超対称性の徴候がないのに、理論家がこれまで超対称性の理論に興味をもってきた主な理由はその数学的な性質の美しさと、新しい数学形式を作るという一種の挑戦感であった。むかしディラックがモノポールの理論を提唱したときに言ったことだが、理論家は数学的に美しいものは自然が採用しないはずはないという信念を抱く傾向がある。モノポールの理論は、はじめは単なる数学的可能性にすぎなかったが、先ほど述べたように、大統一理論という枠の中では必

然的に存在することがわかってきたから、現実にだいぶん近づいてきたといえる。カルーザークラインの多次元空間の理論にしてもそうである。

具体的問題として超対称理論の魅力的な点はいくつかある。一つは大統一理論の中の階層性がやや自然になることだ。超対称性はなかなか頑丈で破れにくい性質をもっている。フェルミオンに質量を与えるには、カイラル対称性を破って左巻きのフェルミオンと右巻きのフェルミオンとを混合させねばならない。もしこれが超対称性を破るものであればなかなか起こり得ないことになる。すなわちフェルミオンが大統一のスケールの重さになることはないわけである。

また超対称理論では粒子の自己エネルギーなど、くりこみ理論（15章）の動機となった無限大の発散が緩和される。これはボソン場とフェルミオン場の無限大が打ち消し合う傾向があるためである（しかし重力場の発散を扱うにはまだ不十分で超弦理論にまたねばならない）。

最近超対称と関連して発見されたのは普通の粒子とモノポール、すなわち電荷と磁荷の対称性の問題だ。ディラックが示したように、電荷をもった粒子の世界と磁荷をもった粒子の世界は、電場と磁場とを入れ替え、電荷の逆数を磁荷にすれば移り変われるから、一種の双対的関係にある（ただし13章一七七〜一七八ページに出てきた双対性とは別物）。超対称理論の枠の中では、電荷をもった普通の素粒子と磁荷をもったソリトンとでできた世界を、それと双対関係にある別の世界に入れ替えることができる。これは数学的にも物理的にも非常に興味ある事実で今後の発

展が期待される。

しかし超対称理論のこれらの性質はごく一般的なもので、直接実験データと対決できるような数値的予言を与えるものではない。超対称理論の最も痛いところは、存在すべきスーパー・パートナー粒子が一つも見つかっていないことである。それでは何か間接的でもよいから超対称性に都合のよいデータがないだろうか。すでにほのめかしておいたように、最近になってこれが二つ現れた。

標準模型の各成分にスーパー・パートナーを付け加えて倍にしただけのものを超対称標準模型という。例えば色をもつグルーオンの八個組にはフェルミオンの八個組、クォークにはそれと同じ量子数のスカラー（スピン0）場が伴うものとするわけだ。これらのスーパー粒子たちには俗称がついている。一般にフェルミオンに伴うボソンにはsを頭につけて、squark、slepton、selectron などと呼び、ボソンに伴うフェルミオンには後に ino をつける。光子（photon)、W、Z、ヒッグズ・ボソンに対してそれぞれ photino、wino、zino、higgsino というふうに。しかしスーパー・パートナーは全然見つかっていないから、すべていまの加速器では作れないような重いものと仮定せねばならない。すなわち超対称性は破れている。

では、破れはどのあたりのエネルギーで起こっているのだろうか？　残念ながらこれにも手がかりがない。またいかにして超対称が自発的に破れるのかもよくわからない。そこでともかく標

準模型のエネルギーのすぐ上の一TeVのあたりで超対称が破れてスーパー・パートナーたちが一TeV程度の質量を獲得し、それ以上では対称性が保たれていると仮定しよう。ゲージ場の結合定数のエネルギーによる変化の速さは、一般にゲージ場の荷電を担う粒子の種類や数に依存するものであるから、現在知れている$SU(3)$、$SU(2)$、$U(1)$の結合定数を一TeVから上にのばしていくと、スーパー・パートナーが加わったために標準理論の場合とは少し変わって、10^{16}GeVのあたりで三つの曲線がきれいに交わることが発見された（二八九ページ）。

　これは標準模型よりも超対称標準模型のほうが大統一の可能性にかなっていることを示すものではないだろうか。そのうえ、統一エネルギーが高くなったために陽子崩壊の寿命がのびて、現在までの実験にかからなかったのではないか。

　もっと積極的な面をみると、現在の加速器のエネルギーよりも少し上のところに何か新しい現象が現れるだろうという予測は超対称理論だけでなく、前述のテクニカラー理論からも期待されたことである。これは大統一までに少なくとももう一段階があることで、CERN（セルン）のLHC、日本のJLCなど次の世代の加速器計画に大いに励ましをあたえるものだ。

② カルーザ‐クラインの多次元空間理論

　カルーザ‐クライン理論というのは歴史的には素粒子物理よりも古い。アインシュタインの四次元空間理論を拡張し四次元以上の空間を導入する理論で、アインシュタインの重力場理論に刺

激されて、カルーザとクラインが電磁場をも幾何学的な量として解釈できることを示したことから始まる。

では時空の次元を超えた他の次元とは何だろうか？　時空がもし五次元だったとしたら、なぜわれわれは第五次元の方向に動けないのか？　この質問に対する答は次のようである。

われわれがいま狭いトンネルの中にいるとしよう。その中で自由に動ける方向は、トンネルにそった方向だけで、横に動けばすぐ壁にあたってしまう。つまりトンネルの中の空間は事実上は一次元的で、他の二次元の方向にはあまり広がっていない。この考えを数学的に拡張し、例えば五次元の空間でも、第五次元の方向の広がりは非常に小さいとすれば、これは普通の四次元空間に近いものになる。

トンネルの代わりに、マイクロ波の回路として使われる導波管を考えてもよい。この中を電波が管の方向に伝わるのだが、横の方向の断面の大きさによって伝播の性質が変わる。電波はまっすぐ管の方向に進むだけでなく、壁にぶち当たってジグザグ運動することもできるからである。ジグザグすれば縦の方向に進む速度は普通の光速度より遅く、その電波の量子はあたかも質量のある粒子のようにふるまう。だから縦に伝播する粒子の質量は横の次元の大きさによるものと考えることもできる。トンネルや導波管の断面は二次元であるが、その代わりに円筒の表面だけ（すなわち断面は一次元の円周）をとる方が簡単で、この場合は円筒にまきついて進む波が質量

をもつことになる。

カルーザ‐クライン理論の魅力はこれだけではない。重力場とは、アインシュタインの理論では時空の曲がりを表すものであったが、同様にして電磁場とは四次元の時空と、第五次元方向への曲がり方（つまり円筒の曲率）に関係するものと解釈される。

現在のゲージ理論の立場では、素粒子のもつ内部量子数は電磁的電荷だけでなく、$SU(2)$、$SU(3)$など非アーベル的ないろいろな種類を考えねばならない。これらをも幾何学的なものと解釈しようとすれば空間の次元をふやさねばならないのは当然であろう。都合のよいことには、非アーベル的なゲージ場は曲がった空間と同じ性質をもっていて、幾何学的解釈が自然に可能であるが、なぜ四次元と他の次元が異なっているのか、自然界は他の次元の性質をいかにしてえらんだのか、という質問に答えてはくれない。しかし次に述べる超弦理論において、カルーザ‐クラインの考え方は大いにその魅力を発揮してきたから、こういう問題はもし解答があるとすれば超弦理論の中に求められるべきであろう。

③ 超弦理論

超弦理論は13章で詳しく紹介したひもの理論（ハドロンの弦模型）から発展したものだが、これに超対称性とカルーザ‐クライン理論の概念をとり入れ、大風呂敷を広げて自然界のあらゆる粒子も場も記述の対象に包み込もうとする。

　ハドロンの弦模型は、ハドロンの性質を半定量的に記述することには成功したが、いろいろ数学的欠陥を含んでいるのみならず、色のゲージ理論（QCD）の出現によって、単にQCDの一つの性質を反映する現象論的模型とみなされるようになってしまった。しかし実際現象への応用を忘れて、数学的に弦模型を追究していくと、いろいろ意外な結果が出てくる。まず、弦が四次元の時空の中でなく、二六次元の時空（一次元の時間と二五次元の空間）の中で動けば数学的困難がなくなることが早くから知られていた。困難というのは、弦の運動を量子論的に扱うと、量子効果（いわゆる零点振動）のために弦がやんちゃ坊主のようにやたらに大きく揺れ動き、二六次元の世界以外ではコントロールできなくなることであった。また弦はもともとボソン的で、整数のスピンのレッジェ軌道をなすものだが、これにフェルミオン的な半整数スピンの軌道をつけ加えて、一種の超対称性をもった弦の理論を作りうることも知られていた。この場合には時空は二六次元でなく一〇次元であればよろしい。

　このような特別の次元でのレッジェ軌道をしらべると、質量が0でスピンが1と2の粒子が現れ、それぞれ電磁場、重力場としての資格を備えていることがわかる。

　だから思い切って、ゲージ場や重力場が基本的なものではなく、これらは実は弦の振動の量子にすぎないと考えたらどうだろう。ハドロンのひもの場合には、ひもの広がりは一フェルミ（10^{-13}センチメートル）の程度だったが、重力をひもの運動と考えるためには、プランクの長さ（10^{-33}セ

ンチメートル）というとてつもなく小さいものと仮定せねばならない。エネルギーにして、10^{19} GeV だから、大統一エネルギーの10^{16} GeV よりもさらに大きなものが質量の単位になる。

実に雄大な構想と言わねばならない。重力場をも含めて、あらゆる場と粒子が完全に統一されてしまう。その代わり、個々の素粒子の質量や相互作用を詳細に決定するという、これまでの素粒子物理の主要目的を当分おあずけにして、理論としての内部矛盾がないかだけを主な問題とするのである。

一九七〇年代からの理論の発展の中には、このような考え方が底流として現れていたが、特にシュウォーツのような少数の学者が黙々として研究を続けた結果、超対称性をそなえた有望な理論の候補が登場した。それはグリーンとシュウォーツの発見したもので、彼らはこれを一般にスーパー・ストリング（超弦）理論と名づけた。しかし超弦理論にもいろいろなモデルが可能である。実世界に適用できるためには標準模型や大統一理論がそれから導かれるようなものでなければならない。グロス－ハービー－マーチネクが、二六次元の弦と一〇次元の弦とを組み合わせて作ったヘテロティック・ストリングというものは、この意味で現実に一番近い理論であると見られている。

こうなると、物理学は究極的にはスーパー・ストリングというひもに帰着してしまう。くりこみを必要とするような無限大の量は現れず、あらゆる素粒子の質量や結合定数は原理的に計算可

能となり、一〇次元、二六次元などの多次元空間がカルーザ－クライン的に四次元の時空と内部空間に分かれることも説明がつくだろう……。

こんな話はまだ半ば夢の段階であって、今までに得られた結果を楽観的に延長した期待なのだが、まじめにこんな期待がもてるというだけでも驚くべきことである。

超弦理論に関して、その後最近にいたるまで新しい結果が次々に発見されている。例えば前に出てきた電荷と磁荷の双対性が成り立つこと、一次元の弦理論が多次元のソリトンにも拡張されてそれらの間に双対関係があることなどがわかってきた。超弦理論のいろいろなモデルが実はこの意味で双対関係にあるようだ。

もちろん超弦理論が真の物理法則であるという保証はないし、また超弦理論だけですべてが解決するかどうかは、少なくとも私には大いに疑問である。自然はわれわれの想像以上に複雑豊富なものであると思うからだ。しかし以上でおわかりのように、素粒子物理学は一つの転換期（あるいは危機と言ってもよい）に直面している。実験と理論が助け合いながら、足並みをそろえて進むという、従来の自然科学の伝統が破られようとしている。これは、理論の躍進と実験能力の行き詰まりの両方がたまたま同時に起こったからである。現在の理論的予想をくつがえすような新しい事実が発見されるならばともかく、この傾向はわれわれの望むと望まぬとにかかわらず、これからも続くと考えねばならないだろう。私は人文や建築における用語を借用して、ポスト・

モダン（モダン以後の）物理学という表現を提唱したい。

最後に現実にもどって、冷静に現在の物理学と、物理学を追究するわれわれの立場を考えよう。われわれが本当に驚嘆せざるを得ないのは、自然の秘密が次から次へと解明されていくことではなかろうか。宇宙の生誕から一〇〇億年後の一瞬間とも言うべき現在の時期に、その中の物質の一部をなすわれわれが宇宙の法則を見出し、その歴史を知り、物質自身も有限の寿命をもつ一時的存在かもしれないと悟るのは、まことに不思議だと言わねばならない。

用語解説

アインシュタイン－ド・ブロイの関係

粒子のエネルギーE、運動量pは、その粒子を代表する量子力学的な波（波動関数）の波数k（波長の逆数）、振動数ν（周期の逆数）にそれぞれ比例し、

$$E = h\nu,\ p = hk$$

と書かれる。前者はアインシュタインにより、後者はド・ブロイにより導かれた。hはプランクの定数である。単位の都合により$h/2\pi$を使うことが多いが、これを$\hbar$で表す。$\hbar$の値は10^{-27}エルグ秒。

アーベル群と非アーベル群

$2+3=3+2$，$2\times3=3\times2$

しかし前進してから右へ曲がるのと、右へ曲がってから前進するのとでは結果がちがう。だから、たし算やかけ算の操作はそれぞれ可換的、前進の操作と方向転換の操作とは非可換的である。可換的な要素のみからなる群はアーベル群、そうでない場合は非アーベル群と呼ばれる。一つの軸のまわりの回転の全体はアーベル群、あらゆる方向の軸のまわりの回転（三次元空間の回転）の全体は非アーベル群をなす。量子力学では、角運動量は回転に関する保存量であることは

8章で述べたが、荷電粒子のもつ電荷は、一方向の回転に関する角運動量と数学的に似た性質をもっている。これに対しヤン‐ミルズ場の電荷に相当するアイソスピンは、その名の示すごとく三次元空間の回転に関する角運動量と類似する。電磁場がアーベル的ゲージ場（アーベル場）、ヤン‐ミルズ場が非アーベル的ゲージ場（非アーベル場）と呼ばれるゆえんである。

コンプトン波長

長さ、時間、質量の三つは物理的記述に必要な基本量で、他の量はたいていこれらの組合せで表されるが、質量とエネルギーの間のアインシュタインの関係 $E=mc^2$、エネルギー、運動量と時間、長さとの間のアインシュタイン‐ド・ブロイの関係を使えば、右の三種類の単位を光速度c、プランク定数$\hbar$の組合せによって一方から他方へ換算することができる。

この処方に従って、素粒子の質量mを長さの単位にひき直したものをコンプトン波長といい、$\frac{\hbar}{mc}$で与えられる。その粒子に固有の量子力学的広がりを表すものである。電子のコンプトン波長は水素原子の大きさの$\frac{1}{137}$、すなわち約10^{-11}センチメートル、パイオンのそれは原子核の大きさ程度、すなわち約10^{-13}センチメートルである。

散乱

散乱は素粒子物理の基本的実験方法である。ビリヤード（撞球）の場合と本質的に同じもの

で、一つの粒子が他の粒子に衝突すれば散乱が起こる。ただし散乱後に粒子が励起状態に移ったり、アイデンティティを変えたり、二つ以上の粒子になったりすることもある。これらを非弾性散乱、ビリヤードのような場合を弾性散乱という。

一つの的(まと)粒子が、入射する粒子の流れの中に置かれたとする。流れの強さは一平方センチメートルの断面に、一秒間一個の粒子が通過するとしたとき、一秒間に散乱される粒子の数が散乱断面積である。断面積と、散乱方向の確率分布(角分布)が、粒子の相互作用をさぐる重要な手がかりとなる。

不確定性原理(ハイゼンベルクの)

量子力学においては、粒子の位置xと運動量pを同時に確定することが原理的に不可能である。それぞれの不確定度(ゆらぎ)をΔx、Δpとすれば、その積はプランク定数$\hbar$程度より小さくはできない。同じ関係は時刻とエネルギーの間にも成り立つ。

不確定性の由来は粒子の波動的性質である。波は本質的に広がりをもったもので、波長(または周期)を大きくすれば必然的に空間的(または時間的)広がりが大きくなるが、これらはアインシュタイン－ド・ブロイの関係によって運動量(またはエネルギー)の逆数に比例するから右の拘束が生ずるのである。

もし例えば運動量が厳密にpで、不確定度Δpが0(したがってΔxは無限大)ならば、その状態

は運動量の固有状態であり、固有値pをもつという。

プランク質量（プランクエネルギー）

重力は電磁力や弱い力に比べても非常に弱いもので、素粒子の世界ではふつう問題にしなくてもよいが、非常に高いエネルギー、または非常に短い距離では重力も量子力学で取り扱わねばならず、その効果は無視できなくなると考えられる。このエネルギーの目安を与えるものがプランク質量（プランクエネルギー）である。ニュートンの重力定数G、光速度c、プランク定数$\hbar$の組合せで$(\hbar c/G)^{1/2}$と表される。プランク質量の大きさは2×10^{-5}グラム、エネルギーに直して、10^{19}GeVである。また長さ（すなわちコンプトン波長）や時間に換算すれば10^{-33}センチメートル、および10^{-43}秒程度となる。これらをプランクの長さ、プランクの時間という。

ゆらぎ

物理量が厳密に一定の値をとらず、不規則に変動することを意味する。その原因は例えば外部からの干渉による場合などもあるが、量子力学においては本質的なもので、特別の場合（その物理量の固有状態）以外には必ず現れ、除くことはできない。

ラム・シフト

原子の中の電子のエネルギー準位がディラック方程式によって計算した値からわずかにずれる現象をラム・シフトという。一九四七年コロンビア大学のラム（W. Lamb）により発見されたが、そのころちょうどくりこみ理論が完成しかけていたので、理論の正しさを証明する最初のテストとなった。ラム・シフトの原因は電子が仮の光子を絶えず放出、再吸収しているので、反跳のため広がりをもつことによる。ラムはこの仕事によってノーベル賞を受けた。

量子化

量子力学では物理量（の固有値）を連続的に変えることができず、「量子条件」を満たす特別の値しか許されぬことが多い。このような条件を課することを量子化という。原子の中の電子のエネルギーや角運動量は量子化されている。また光子は電磁波の振動が量子化された結果生じる。電荷、アイソスピンなどを（内部）量子数というのは、これらがやはり量子化されていると考えられるからである。

励起状態

複合粒子（原子、原子核、ハドロンなど）には一般に多くのエネルギー準位が存在し、その中のどの状態をもとりうるが、最も低いエネルギーの状態を基底状態、それ以外を励起状態とい

う。励起状態は一般に不安定で、光子などの粒子を放出して基底状態に崩壊するから、基底状態が通常の状態である。

励起状態を作るには基底状態に特定のエネルギーを外部から与えねばならぬ。その一つの方法は崩壊の逆過程をやらせることである。例えば光子を的の複合粒子にあてれば、光子のエネルギーが励起に必要なエネルギー（励起エネルギー）にマッチしたとき望みの反応が起こるが、これが再び光子を放出して崩壊すれば光子の共鳴散乱として観測される。

〈ワ〉

〈ナ〉

〈ハ〉

〈タ〉

〈サ〉

〈カ〉

〈ア〉

さくいん

（太字は巻末用語解説の見出しページ）

〈数字・欧文〉

N.D.C.429.6　326p　18cm

ブルーバックス　B-1205

クォーク 第2版
素粒子物理はどこまで進んできたか

1998年2月20日　第1刷発行
2008年10月28日　第8刷発行

著者　南部陽一郎
発行者　野間佐和子
発行所　株式会社講談社
〒112-8001東京都文京区音羽2-12-21
電話　出版部　03-5395-3524
販売部　03-5395-5817
業務部　03-5395-3615
印刷所　(本文印刷)豊国印刷株式会社
(カバー表紙印刷)信毎書籍印刷株式会社
製本所　有限会社中澤製本所

定価はカバーに表示してあります。

ISBN4-06-257205-2

発刊のことば

科学をあなたのポケットに

二十世紀最大の特色は、それが科学時代であるということです。科学は日に日に進歩を続け、止まるところを知りません。ひと昔前の夢物語もどんどん現実化しており、今やわれわれの生活のすべてが、科学によってゆり動かされているといっても過言ではないでしょう。

そのような背景を考えれば、学者や学生はもちろん、産業人も、セールスマンも、ジャーナリストも、家庭の主婦も、みんなが科学を知らなければ、時代の流れに逆らうことになるでしょう。

ブルーバックス発刊の意義と必然性はそこにあります。このシリーズは、読む人に科学的に物を考える習慣と、科学的に物を見る目を養っていただくことを最大の目標にしています。そのためには、単に原理や法則の解説に終始するのではなくて、政治や経済など、社会科学や人文科学にも関連させて、広い視野から問題を追究していきます。科学はむずかしいという先入観を改める表現と構成、それも類書にないブルーバックスの特色であると信じます。

一九六三年九月　　野間省一

ブルーバックス　物理関係書（I）

79 相対性理論の世界 J・A・コールマン／中村誠太郎＝訳
373 新しい科学論 村上陽一郎
563 電磁波とはなにか 後藤尚久
693 量子力学の考え方 J・C・ポーキングホーン／宮崎　忠＝訳
789 超ひも理論と「影の世界」 広瀬立成
873 時間の不思議 都筑卓司
911 電気とはなにか 室岡義広
1004 質量の起源 広瀬立成
1012 量子力学が語る世界像 和田純夫
1128 原子爆弾 山田克哉
1188 金属なんでも小事典 増本　健＝監修／ウォーク＝編著
1192 元素111の新知識 桜井　弘＝編
1205 クォーク　第2版 南部陽一郎
1213 静電気のＡＢＣ 堤井信力
1216 脳と心の量子論 治部眞里／保江邦夫
1249 図解・わかる電気と電子 見城尚志
1251 心は量子で語れるか ロジャー・ペンローズ／A・シモニー／N・カートライト／S・ホーキング／中村和幸＝訳
1259 光と電気のからくり 山田克哉
1260 ペンローズのねじれた四次元 竹内　薫
1268 相対論対量子論 メンデル・サックス／原田　稔＝訳

1277 自己組織化とは何か 都甲　潔／江崎　秀／林　健司
1285 意識は科学で解き明かせるか 天外伺朗／茂木健一郎
1287 カオスから見た時間の矢 田崎秀一
1295 マンガ　量子論入門 O・サラーティ＝絵／J・P・マッケボイ＝文／治部眞里＝訳
1310 「場」とはなんだろう 竹内　薫
1324 いやでも物理が面白くなる 志村史夫
1328 クイズで学ぶ大学の物理 飽本一裕
1337 パソコンで見る流れの科学（CD-ROM付） 矢川元基＝編著
1347 Ｅｘｃｅｌで学ぶ量子力学（CD-ROM付） 保江邦夫
1378 宇宙核物理学入門 谷畑勇夫
1380 新装版　四次元の世界 都筑卓司
1381 新装版　パズル・物理入門 都筑卓司
1383 高校数学でわかるマクスウェル方程式 竹内　淳
1384 新装版　マックスウェルの悪魔 都筑卓司
1385 新装版　不確定性原理 都筑卓司
1388 新装版　タイムマシンの話 都筑卓司
1389 新装版　新・パズル物理入門 都筑卓司
1390 熱とはなんだろう 竹内　薫
1394 ニュートリノ天体物理学入門 小柴昌俊
1395 科学の大発見はなぜ生まれたか J・アガシ／立花希一＝訳
1404 新・核融合への挑戦 狐崎晶雄／吉川庄一

ブルーバックス　物理関係書（II）

1406	真空とはなんだろう	広瀬立成
1412	脳とコンピュータはどう違うか	茂木健一郎／田谷文彦
1414	謎解き・海洋と大気の物理	保坂直紀
1415	量子力学のからくり	山田克哉
1425	新装版　相対論的宇宙論	佐藤文隆／松田卓也
1442	温度から見た宇宙・物質・生命	ジノ・セグレ　桜井邦朋＝訳
1444	超ひも理論とはなにか	竹内　薫
1445	ゴルフ上達の科学	大槻義彦
1450	応用物理の最前線	早稲田大学理工学部応用物理学科
1452	流れのふしぎ	石綿良三／根本光正＝著　日本機械学会＝編
1480	宇宙物理学入門	桜井邦朋
1483	新しい物性物理	伊達宗行
1484	単位１７１の新知識	星田直彦
1487	ホーキング　虚時間の宇宙	竹内　薫
1499	マンガ　ホーキング入門	Ｊ・Ｐ・マッケボイ＝文　オスカー・サラーティ＝絵　杉山　直＝訳
1505	対称性から見た物質・素粒子・宇宙	広瀬立成
1509	新しい高校物理の教科書	山本明利／左巻健男＝編著
1511	「複雑ネットワーク」とは何か	増田直紀／今野紀雄
1521	音のなんでも実験室	吉澤純夫
1522	判断力を高める推理パズル	鈴木清士
1543	早わかり物理50の公式	保江邦夫＝監修　岡山物理アカデミー＝編
1550	絵で見る物質の究極	江尻宏泰
1555	新装版　物理のＡＢＣ	福島　肇
1560	はじめての数式処理ソフト　ＣＤ－ＲＯＭ付	竹内　薫
1561	新装版　相対論のＡＢＣ	福島　肇
1569	新装版　電磁気学のＡＢＣ	福島　肇
1575	波のしくみ	佐藤文隆／松下泰雄

ブルーバックス　宇宙・天文・地学関係書

1204 川のなんでも小事典　土木学会関西支部＝編
1260 ペンローズのねじれた四次元　竹内　薫
1293 宇宙300の大疑問　S・F・オデンワルド　加藤賢一＝監修　塩原通緒＝訳
1361 宇宙を測る　キティー・ファーガソン　加藤賢一／吉本敬子＝訳
1378 宇宙核物理学入門　谷畑勇夫
1380 新装版　四次元の世界　都筑卓司
1388 新装版　タイムマシンの話　都筑卓司
1390 熱とはなんだろう　竹内　薫
1394 ニュートリノ天体物理学入門　小柴昌俊
1395 科学の大発見はなぜ生まれたか　J・アガシ　立花希一＝訳
1414 謎解き・海洋と大気の物理　保坂直紀
1417 宇宙の素顔　マーティン・リース　青木　薫＝訳
1425 新装版　相対論的宇宙論　佐藤文隆／松田卓也
1442 温度から見た宇宙・物質・生命　ジノ・セグレ　桜井邦朋＝訳
1458 クェーサーの謎　谷口義明
1476 宇宙のからくり　第2版　山田克哉
1487 ホーキング　虚時間の宇宙　竹内　薫
1491 遺伝子で探る人類史　ジョン・リレスフォード　沼尻由起子＝訳
1492 宇宙100の大誤解　ニール・カミンズ　加藤賢一／吉本敬子＝訳
1496 暗黒宇宙の謎　谷口義明
1505 対称性から見た物質・素粒子・宇宙　広瀬立成
1510 新しい高校地学の教科書　杵島正洋　松本直記　左巻健男＝編著
1517 ダイヤモンドの科学　松原　聰
1542 クイズ　宇宙旅行　中冨信夫
1575 波のしくみ　佐藤文隆／松下泰雄
1576 富士山噴火　鎌田浩毅

ブルーバックス12cm CD-ROM付

BC01 太陽系シミュレーター　SSSP＝編

ブルーバックス　化学関係書

335 水とはなにか　上平　恒
920 イオンが好きになる本　米山正信
969 化学反応はなぜおこるか　上野景平
987 新・化学用語小辞典　ジョン・デインテイス=編　山崎　昶／平賀やよい=訳
1123 金属は人体になぜ必要か　桜井　弘
1138 活性酸素の話　永田親義
1152 酵素反応のしくみ　藤本大三郎
1191 接着の科学　竹本喜一／三刀基郷
1270 オゾンの不思議　伊藤泰郎
1296 暗記しないで化学入門　平山令明
1334 マンガ　化学式に強くなる　高松正勝=原作　鈴木みそ=漫画
1336 化学・意表を突かれる身近な疑問　日本化学会=編
1356 高校化学とっておき勉強法　大川貴史
1357 生命にとって酸素とは何か　小城勝相
1375 実践　量子化学入門(CD-ROM付)　平山令明
1392 微粒子から探る物性七変化　前野昌弘
1439 味のなんでも小事典　日本味と匂学会=編
1456 光触媒とはなにか　佐藤しんり
1508 新しい高校化学の教科書　左巻健男=編著
1512 暗記しないで化学入門　無機化学編　平山令明
1527 光化学の驚異　光化学協会=編
1534 化学ぎらいをなくす本　新装版　米山正信
1566 ナノカーボンの科学　篠原久典

ブルーバックス12cm CD-ROM付

BC03 完全版　分子レベルで見た体のはたらき　平山令明
BC07 ChemSketch で書く簡単化学レポート　平山令明

ブルーバックス　コンピュータ・エレクトロニクス関係書

ブルーバックス12cmCD-ROM付

ブルーバックス　数学関係書（I）

35 計画の科学　加藤昭吉
116 推計学のすすめ　佐藤 信
120 統計でウソをつく法　ダレル・ハフ　高木秀玄＝訳
177 ゼロから無限へ　C・レイド　芹沢正三＝訳
217 ゲームの理論入門　モートン・D・デービス　桐谷 維／森 克美＝訳
297 複雑さに挑む科学　柳井晴夫／岩坪秀一
312 非ユークリッド幾何の世界　寺阪英孝
325 現代数学小事典　寺阪英孝＝編
716 マンガ　数学小事典　岡部恒治
722 解ければ天才！　算数100の難問・奇問　中村義作
776 コンピュータもびっくり！　速算100のテクニック　中村義作
797 円周率πの不思議　堀場芳数
833 虚数iの不思議　堀場芳数
862 対数eの不思議　堀場芳数
868 数学パズル・20の解法　中村義作
899 解ければ天才！　算数100の難問・奇問　PART3　中村義作
908 数学トリック＝だまされまいぞ！　仲田紀夫
926 原因をさぐる統計学　豊田秀樹／前田忠彦／柳井晴夫
988 論理パズル101　デル・マガジンズ社＝編　小野田博一＝編訳
989 数学を築いた天才たち（上）　スチュアート・ホリングデール　岡部恒治＝監訳
990 数学を築いた天才たち（下）　スチュアート・ホリングデール　岡部恒治＝監訳

1003 マンガ　微積分入門　岡部恒治　藤岡文世＝絵
1013 違いを見ぬく統計学　豊田秀樹
1030 パズルで挑戦！　IQ150への道　笹山朝生
1037 道具としての微分方程式　斎藤恭一　吉田 剛＝絵
1040 数学パズル・パンドラの箱　B・ボルト　木村良夫＝訳
1054 数学オリンピック問題にみる現代数学　小島寛之
1062 算数オリンピックに挑戦　算数オリンピック委員会＝監修　雅 孝司＝編
1074 フェルマーの大定理が解けた！　足立恒雄
1076 トポロジーの発想　川久保勝夫
1106 脳を鍛える数理パズル　デイビッド・ウェルズ　芦ヶ原伸之＝監訳
1141 マンガ　幾何入門　岡部恒治＝著　藤岡文世＝絵
1145 データ分析 はじめの一歩　清水 誠
1201 自然にひそむ数学　佐藤修一
1203 孫子の兵法の数学モデル　木下栄蔵
1243 高校数学とっておき勉強法　鍵本 聡
1250 パソコンらくらく数学（CD-ROM付）　新村秀一
1278 無限のパラドクス　足立恒雄
1283 推測統計 はじめの一歩　清水 誠
1286 Excelで学ぶ金融市場予測の科学　保江邦夫
1288 算数オリンピックに挑戦　'95～'99年度版　算数オリンピック委員会＝編
1289 代数を図形で解く　中村義作／阿邊恵一

ブルーバックス　数学関係書（Ⅱ）

1312 マンガおはなし数学史　仲田紀夫＝原作　佐々木ケン＝漫画
1332 新装版　集合とはなにか　竹内外史
1352 確率・統計であばくギャンブルのからくり　谷岡一郎
1353 算数パズル「出しっこ問題」傑作選　仲田紀夫
1366 数学版・これを英語で言えますか？　保江邦夫＝著　E・ネルソン＝監修
1372 数学にときめく　新井紀子＝著／ムギ畑＝編
1374 お話・数学基礎論　八杉満利子／林　晋
1383 高校数学でわかるマクスウェル方程式　竹内　淳
1386 素数入門　芹沢正三
1393 不変量とはなにか　今井　淳／寺尾宏明／中村博昭
1397 数の論理　保江邦夫
1402 Q&Aで学ぶ確率・統計の基礎　木下栄蔵
1403 パソコンで遊ぶ数学実験（CD-ROM付）　涌井良幸　涌井貞美
1407 入試数学　伝説の良問100　安田　亨
1419 パズルでひらめく　補助線の幾何学　中村義作
1422 最新・Excelで学ぶ金融市場予測の科学　保江邦夫
1428 ゆっくり考えよう！　高校・総合学習の数学　佐々木正敏
1429 数学21世紀の7大難問　中村　亨
1430 Excelで遊ぶ手作り数学シミュレーション　田沼晴彦
1433 大人のための算数練習帳　佐藤恒雄
1440 算数オリンピックに挑戦　'00～'03年度版　算数オリンピック委員会＝編

1453 大人のための算数練習帳　図形問題編　佐藤恒雄
1455 新装版　数学・まだこんなことがわからない　吉永良正
1470 高校数学でわかるシュレディンガー方程式　竹内　淳
1479 なるほど高校数学三角関数の物語　原岡喜重
1490 暗号の数理　改訂新版　一松　信
1493 計算力を強くする　鍵本　聡
1494 間違いさがしパズル傑作選　中村義作／阿邊恵一
1515 論理力を強くする　小野田博一
1536 計算力を強くするpart2　鍵本　聡
1547 広中杯　ハイレベル中学数学に挑戦　算数オリンピック委員会＝監修　青木亮二＝解説
1549 大人のための算数練習帳　中学入試編　佐藤恒雄
1557 やさしい統計入門　田栗正章／藤越康祝　柳井晴夫／C・R・ラオ
1560 はじめての数式処理ソフト　CD-ROM付　竹内　薫
1567 音律と音階の科学　小方　厚

ブルーバックス12cmCD-ROM付

BC04 ロールプレイで学ぶ経営数学　横手光洋
BC05 パソコンらくらく高校数学　微分・積分　友田勝久　堀部和経
BC06 JMP活用　統計学とっておき勉強法　新村秀一